L22DC

savills investment management

SAVILLS I.M. SGR S.P.A.
Sede: Via San Paolo
20121 Milano

LIN10
Via della Costa, 2, Treviglio (BG), 24047
Edificio Ad Uso Data Center

VALUTAZIONE IMPATTO AMBIENTALE
ai sensi degli artt. 23-25 del D.Lgs. n.152/2006

Studio vibrazionale

Documento
4210_ES V SV 01

Revisione
V.-

Data
Ottobre 2026

Proprietario
Savills I.M. SGR S.p.A

Il tecnico
ambiente s.r.l.

Firmato digitalmente da:
PAOLA ENRICA FIORINI
Data: 28/10/2026 11:52:58

COMPANY WITH MANAGEMENT SYSTEM CERTIFIED BY DNV GL
= ISO 9001 =
= ISO 14001 =
= ISO 45001 =

PROPONENTE:	PROGETTO:
SAVILLS I.M. SGR S.P.A Sede: Via San Paolo 20121 Milano	***LIN 10*** Via della Costa, 2, Treviglio (BG)

Valutazione di Impatto Ambientale ai sensi degli artt. 23-25 del D.Lgs. 152/06

STUDIO VIBRAZIONALE

IN.25.014	*ottobre 2026*	*Prima emissione*	*R. Mani*	*T. Baruzzo*	*A. Lucioni*
COMMESSA	*DATA*	*REV*	*REDATTO*	*VERIFICATO*	*APPROVATO*

ambiente
ingegneria ambientale
APEM Group

Sede di Milano
via Tibullo 2 – 20151 Milano
Tel. 0245473370
Fax. 0245473371

Web page: www.ambientesc.it

Altre sedi principali
Carrara (sede legale e operativa) Via Frassina, 21 - 54033 Carrara (MS) - Tel. 0585/855624 - Fax. 0585/855617
Firenze Via di Soffiano, 15 - 50143 Firenze (FI) - Tel. 055/7399056 - Fax 055/7134442
Roma Via C. Colombo, 149 - 00147 Roma (RM) - Tel. 06/45678571
Taranto Via Matera, km 598/I - 74014 Laterza (TA) - Mob. 347/1083531

Con il presente documento, ***Ambiente s.r.l.*** ha eseguito il mandato affidatole da **L22 PER ECHELON DATA CENTERS** con la diligenza richiesta.

Le elaborazioni ed i risultati illustrati nel presente documento, sono stati ottenuti ottemperando le normative vigenti e le regole riconosciute nel settore di operatività e sono basati sullo stato delle conoscenze all'atto di stesura del rapporto.

In riferimento a ciò Ambiente s.r.l. ha proceduto alla predisposizione della presente documentazione richiesta secondo le informazioni e le specifiche fornite dalla Committenza, la quale pertanto si assume ogni qualsivoglia responsabilità in ordine alla veridicità e correttezza delle stesse.

A tal fine, ***Ambiente s.r.l.*** considera che:

- il committente, o i terzi da lui designati, hanno fornito tutte le informazioni corrette ed i documenti completi per l'esecuzione del mandato;
- il presente documento non verrà utilizzato in modo parziale;
- le elaborazioni ed i risultati conseguiti presenti nel seguente documento non verranno utilizzati per uno scopo diverso da quello convenuto o per altro oggetto, né saranno trasposti a circostanze modificate, senza essere stati riesaminati;
- nel presente documento con il termine "Committente" si intende la società L22 PER ECHELON DATA CENTERS che ha incaricato ambiente S.r.l per la redazione del presente documento.

SOMMARIO

1 INTRODUZIONE 6

2 INQUADRAMENTO NORMATIVO 7

2.1 RIFERIMENTI LEGISLATIVI 7

2.1.1 ISO 2631 "Valutazione sull'esposizione del corpo umano alle vibrazioni" 8

2.1.2 UNI 9614 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo" 9

2.1.3 UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici" 18

2.2 LINEE GUIDA MASE D.D. VA N. 257 DEL 02/08/2024 20

2.3 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 20

3 INQUADRAMENTO DELL'AREA 22

3.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE 22

3.2 INDIVIDUAZIONE DEI RICETTORI 24

3.3 CONTESTO GEOLOGICO 25

3.3.1 Inquadramento geologico e geomorfologico 25

3.3.2 Caratterizzazione geologica e litostratigrafica del sito 27

3.3.3 Caratterizzazione del terreno ai fini della modellazione vibrazionale 27

4 VALUTAZIONE DEL CLIMA VIBRAZIONALE ATTUALE 29

4.1 MONITORAGGIO VIBRAZIONALE 29

4.2 CONFRONTO CON I LIMITI 31

4.3 VALUTAZIONE DELLO STATO ATTUALE DELLE VIBRAZIONI 31

5 STUDIO DI IMPATTO VIBRAZIONALE – MODELLO PREVISIONALE 33

5.1 DEFINIZIONE DEL DISTURBO VIBRAZIONALE 33

5.2 METODOLOGIA PER LA VALUTAZIONE DEI LIVELLI VIBRAZIONALI INDOTTI DAL CANTIERE 33

5.3 MODELLO DI CALCOLO 36

5.3.1 Sorgenti superficiali 36

5.3.2 Sorgenti in profondità 38

5.3.3 Sintesi delle ipotesi assunte 39

6 VALUTAZIONE PREVISIONALE DI IMPATTO VIBRAZIONALE – FASE DI CANTIERE 40

6.1 INTRODUZIONE 40

6.2 INQUADRAMENTO DEGLI INTERVENTI IN PROGETTO 41

6.3 VALUTAZIONE DEGLI ASPETTI AMBIENTALI LEGATI AL CANTIERE 41

6.3.1 Definizione degli scenari di lavoro 42

6.3.2 Valutazione della propagazione delle vibrazioni 44

6.3.3 Stima dei futuri livelli vibrazionali 45

6.3.4 Valutazione delle vibrazioni ai ricettori 47

6.3.5 Misure di prevenzione e mitigazione 49

7 VALUTAZIONE PREVISIONALE DI IMPATTO VIBRAZIONALE – FASE DI ESERCIZIO 52

7.1 INTRODUZIONE 52

7.2 DESCRIZIONE DELLE SORGENTI DI VIBRAZIONI CONNESSE ALL'OPERA 52
7.2.1 Chiller in copertura ai corpi di fabbrica dei data center 53
7.2.2 Parco generatori di energia elettrica a terra 54
7.2.3 Viabilità pertinente al data center 66

8 CONCLUSIONI 68

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2-1 - Individuazione corretta e non corretta dei punti di misura 12
Figura 2-2 - Schema di calcolo dell'accelerazione ponderata efficace secondo la UNI 9614:2017 15
Figura 2-1 Inquadramento territoriale (estratto Annex Constructability Assessment) 22
Figura 2-2 Localizzazione del Progetto 22
Figura 3-2 - Quadro territoriale dell'area di intervento 23
Figura 3-3 - Localizzazione dei recettori nell'area 24
Figura 3-4 – Inquadramento geologico (stralcio Tav. 1 allegata alla Componente geologica comunale) 27
Figura 4-1 - Localizzazione dei recettori nell'area e postazione di misura 30
Figura 4-2 - Foto delle posizioni del punto di misurazione VIB_01 31
Figura 5-1 – Relazione tra mezzi d'opera e spettro di emissione di vibrazioni 33
Figura 5-2 – Filtri di ponderazione per i diversi assi di riferimento 34
Figura 5-3 – Propagazione dello spettro di vibrazione 35
Figura 5-4 – Valutazione della propagazione del livello di vibrazioni (Vettore Sorgente) a diverse distanze 36
Figura 5-5 – Tipi di onda di volume e di superficie (a sinistra) e velocità relativa delle onde P, R rispetto onde S (a destra) 36
Figura 5-6 – Schema della propagazione a partire da una sorgente profonda 38
Figura 6-1 – Inquadramento planivolumetrico del Data Center LIN10 (Treviglio) sovrapposto a ortofoto 41
Figura 6-2 – Spettri delle sorgenti dei macchinari con confronto con curva di percezione della UNI 9614 per l'asse Z 44
Figura 6-3 – Propagazione dei livelli di accelerazione in dB (UNI 9614) per singola frequenza 45
Figura 6-4 – Propagazione dei livelli di accelerazione stimati sui ricettori residenziali per lo Scenario 01 46
Figura 6-5 – Ampiezza propagazione delle vibrazioni – Sc.01 48
Figura 7-1 – Posizione chiller in copertura (in verde) dei data center 53
Figura 7-2 – Spettro delle sorgenti dei macchinari con confronto con curva di percezione della UNI 9614 per l'asse Z 57
Figura 7-3 – Propagazione dei livelli di accelerazione in dB (UNI 9614) per singola frequenza 57
Figura 7-4 – Propagazione dei livelli di accelerazione stimati sui ricettori residenziali in fase di esercizio dei generatori 59
Figura 7-5 – Ubicazione dei generatori elettrici diesel considerati nei diversi scenari di test 60
Figura 7-6 Ampiezza propagazione delle vibrazioni in fase di esercizio – Scenario di test 1 61
Figura 7-7 Ampiezza propagazione delle vibrazioni in fase di esercizio – Scenario di test 2 62
Figura 7-8 Ampiezza propagazione delle vibrazioni in fase di esercizio – Scenario di test 3 63
Figura 7-9 Ampiezza propagazione delle vibrazioni in fase di esercizio – Scenario di test 4 64
Figura 7-10 - Influenza della rugosità del fondo stradale - (a) fondo buono - (b) fondo scadente 66

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 4-1 - Dettaglio dei rilievi effettuati durante la campagna di misurazione di agosto 2026 29
Tabella 4-2 - Risultati monitoraggio vibrometrico presso ricettore R11 29
Tabella 4-3 - Confronto con il limite diurno 31
Tabella 4-4 - Confronto con il limite notturno 31
Tabella 5-1 - Definizione dell'esponente n in base al tipo di sorgente e onda 37
Tabella 5-2 - Coefficiente di attenuazione 37
Tabella 6-1 - Sintesi distanze dal confine dell'area di cantiere per cui si hanno valori di vibrazioni eccedenti i limiti 47
Tabella 7-1 - Sintesi distanze dai singoli generatori per cui si hanno valori di vibrazioni eccedenti i limiti 59

Allegati

Allegato 1 – Certificati misure vibrometriche

Allegato 2 – Certificati strumentazione

1 INTRODUZIONE

Il presente documento costituisce la **Valutazione di Impatto Vibrazionale predisposta** in **risposta alla richiesta di documentazione integrativa** formulata nell'ambito della Procedura di Valutazione d'Impatto Ambientale, ai sensi dell'art. 23 del D.lgs. 152/2006 e ss.mm.ii. relativa al progetto di realizzazione del nuovo **Data Center denominato "LIN10"**, situato in Via della Costa 2 a Treviglio (BG).

In particolare, il presente studio è redatto in riferimento alla prescrizione n.4.2 contenuta nel Parere del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), che richiede di *"predisporre uno studio specifico degli impatti vibrazionali associati alle attività di cantiere e di esercizio dell'intervento, valutando il contributo delle principali sorgenti vibrazionali previste, individuando i ricettori maggiormente esposti e verificando il rispetto dei riferimenti tecnici e normativi applicabili."*

L'intervento prevede la riconversione funzionale di un edificio industriale dismesso esistente, con l'obiettivo di trasformarlo in un Data Center al servizio di più aziende, ospitandone i dati e ricoprendo così una funzione di pubblica utilità. Il nuovo Data Center ospiterà i macchinari (server) e i relativi sistemi di supporto, quali gli impianti di ventilazione e condizionamento. All'esterno sono inoltre previsti generatori di emergenza, destinati a garantire la continuità dell'alimentazione elettrica in caso di interruzione della rete. Per quanto riguarda le accensioni in situazioni di emergenza, le emissioni vibrazionali associate al funzionamento dei generatori non rientrano nella presente valutazione, in analogia alle emissioni acustiche, le quali, in tali condizioni di funzionamento, non sono soggette a limiti normativi, come previsto dalle Linee Guida MASE D.D. VA n. 257 del 02/08/2024, punto iii) del paragrafo 2.10 "Rumore".

Lo scopo del presente studio è pertanto la verifica dei livelli previsti all'interno dei recettori potenzialmente influenzati dalle emissioni delle vibrazioni dell'impianto in esame, in ottemperanza a quanto proposto dalla UNI 9614:2017 e le eventuali misure di mitigazione realizzabili. Il presente studio ha, altresì lo scopo di valutare gli impatti potenziali dei cantieri relativi alla realizzazione dell'impianto e delle viabilità di accesso.

Questa relazione costituisce, pertanto, la valutazione dell'impatto vibrazionale dei nuovi impianti da installare sviluppata in riferimento alla UNI 9614:2017 "*Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo*". In particolare, si propone di:

- valutare i livelli di emissione delle vibrazioni generati durante la fase di esercizio del data center e di test dei generatori all'interno dei ricettori adiacenti all'area di studio;
- verificare l'eventuale conformità ai limiti delle vibrazioni previste dalla norma nazionale;
- valutare l'impatto delle vibrazioni in fase di cantiere.

La redazione del presente studio in ambito vibrazionale è stata curata dalla Dott.ssa Geol. Rebecca Mani.

2 INQUADRAMENTO NORMATIVO

Lo studio vibrazionale è stato sviluppato coerentemente a quanto prescritto dal quadro normativo vigente. Nel seguito si riporta l'elenco delle normative a carattere nazionale e di specifico interesse per la presente relazione.

2.1 Riferimenti legislativi

A differenza del rumore ambientale, regolamentato a livello nazionale dalla Legge Quadro n. 447/95, non esiste al momento alcuna legge che stabilisca limiti quantitativi per l'esposizione alle vibrazioni. Esistono invece numerose norme tecniche, emanate in sede nazionale ed internazionale, che costituiscono un utile riferimento per la valutazione del disturbo in edifici interessati da fenomeni di vibrazione.

La caratterizzazione delle emissioni di vibrazioni da parte di veicoli non è soggetta alle stringenti normative e disposizioni legislative che normano invece l'emissione del rumore e sebbene le vibrazioni trasmesse agli edifici non siano state argomento di legiferazione da parte dello Stato italiano è tuttavia universalmente riconosciuta la competenza in materia da parte dell'UNI, ente preposto alla redazione della normativa tecnica in ambito nazionale.

L'UNI ha pubblicato negli anni una completa serie di norme (nazionali e/o recepimenti di norme internazionali) che coprono l'intera problematica delle vibrazioni negli edifici: la valutazione del disturbo alle persone, la valutazione del danno strutturale, l'implementazione della metodologia di misura ecc.

In particolare, le norme di interesse per il presente studio di impatto sono:

- Norma UNI 9614:1990 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo";
- Norma UNI 9614:2017 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo";
- Norma UNI 9916:2004 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici".

Nella UNI 9614:1990 è definito il metodo di misura delle vibrazioni di livello costante immesse negli edifici ad opera di sorgenti esterne o interne agli edifici stessi. La norma concorda parzialmente con la norma internazionale ISO 2631/2. La UNI 9614:1990 ha subito una revisione nel 2017. La UNI 9614:2017 imposta un approccio profondamente diverso nella modalità di valutazione dei disturbi da vibrazione. Per tale motivo, considerando il nuovo approccio proposto dalla revisione del 2017, la valutazione del modello di propagazione sarà eseguita in riferimento alla UNI 9614:2017.

La norma UNI 9916 fornisce una guida per la scelta di appropriati metodi di misura, di trattamento dei dati e di valutazione dei fenomeni vibratori per permettere la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica.

Vi sono, inoltre, norme internazionali di riferimento, fra cui:

- ISO 8041 Human response to vibration – Measuring instrumentation;
- ISO 2631-1, Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General requirements, 1997;

- ISO 2631-2, Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 2: Continuos and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz), 1989;
- ISO 5347, Metodi per la calibrazione dei rilevatori di vibrazioni;
- ISO 5348, Montaggio meccanico degli accelerometri;
- ISO 1683, Acoustics – Preferred reference quantities for acoustic levels, 1983;
- DIN 4150, Vibrations in building. Part 1: Principles, predetermination and measurement of the amplitude of oscillations, 1975;
- DIN 4150-2, Vibrations in building. Part 2: Influence on persons in buildings, 1975;
- DIN 4150-3, Vibrations in building. Part 3: Influence on constructions, 1975.

Per quanto riguarda il disturbo alle persone, i principali riferimenti sono costituiti dalla norma ISO 2631 / Parte 2 "Evaluation of human exposure to whole body vibration / "Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz)". La norma assume particolare rilevanza pratica poiché ad essa fanno riferimento le norme tecniche per la redazione degli Studi di Impatto Ambientale relativi alla componente ambientale "Vibrazioni", contenute prima nel D.P.C.M. 27/12/1988 e a seguito della sua abrogazione nel 2017, dall'Allegato VII alla Parte Seconda del D.Lgs. n. 152/2006 che lo ha sostituito. Ad essa, seppur con alcune non trascurabili differenze, fa riferimento la norma UNI 9614:2017 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo".

Di seguito si fornisce una breve sintesi dei contenuti essenziali delle norme più rilevanti utilizzate per la valutazione dell'impatto da vibrazioni.

2.1.1 ISO 2631 "Valutazione sull'esposizione del corpo umano alle vibrazioni"

La ISO 2631-2 si applica a vibrazioni trasmesse da superfici solide lungo gli assi x, y e z per persone in piedi, sedute o coricate. Il campo di frequenze considerato è 1÷80 Hz e il parametro di valutazione è il valore efficace dell'accelerazione a_{rms} definito come:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a^2(t)\,dt}$$

dove a(t) è l'accelerazione in funzione del tempo, T è la durata dell'integrazione nel tempo dell'accelerazione. La norma definisce tre curve base per le accelerazioni e tre curve base per le velocità (in funzione delle frequenze di centro banda definite per terzi di ottava) che rappresentano le curve approssimate di uguale risposta in termini di disturbo, rispettivamente per le accelerazioni riferite all'asse Z, agli assi X, Y e alla combinazione dei tre assi. L'Annex A della ISO 2631-2 (che non rappresenta peraltro parte integrante della norma) fornisce informazioni sui criteri di valutazione della risposta soggettiva alle vibrazioni; in pratica sono riportati i fattori di moltiplicazione da applicare alle curve base delle accelerazioni e delle velocità al variare del periodo di riferimento (giorno e notte), del tipo di vibrazione (vibrazioni continue o intermittenti, vibrazioni transitorie) e del tipo di insediamento (ospedali, laboratori di precisione, residenze, uffici, industrie). Le vibrazioni devono essere misurate nel "punto di ingresso" nel corpo umano e deve essere rilevato il valore di accelerazione r.m.s. perpendicolarmente alla superficie vibrante. Nel caso di edifici residenziali in cui non è facilmente definibile un asse specifico di vibrazione, in quanto lo stesso edificio può

essere usato da persone in piedi o coricate in diverse ore del giorno, la norma presenta una curva limite che tiene conto delle condizioni più sfavorevoli combinate in tre assi.

2.1.2 UNI 9614 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo"

La UNI 9614:1990 "Vibrazioni - Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo" considera i diversi tipi di sollecitazione vibratoria: livelli costanti, non costanti, impulsivi. La norma definisce metodologia di misura e analisi del segnale al fine di quantificare il disturbo da vibrazioni verso le persone. La vibrazione viene espressa attraverso il concetto di accelerazione:

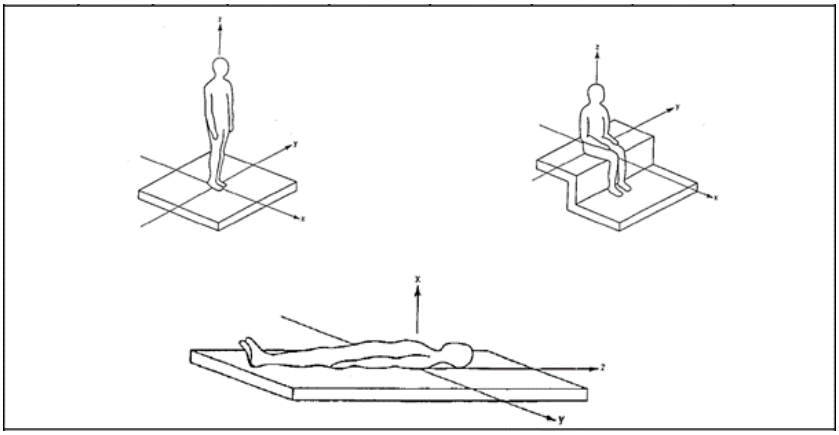
$$a = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a(t)^2 \, dt}$$

o del suo equivalente livello di accelerazione (espressione in dB dell'accelerazione espressa in m/s^2):

$$L_{acc} = 20 \cdot \lg\left[\frac{a}{a_0}\right] \qquad a_0 = 10^{-6} \, m/s^2$$

Nella definizione di accelerazione ponderata a_w prevista dalla norma (che prevede una pesatura in frequenza in funzione della direzione della vibrazione) si fa riferimento al seguente schema.

Frequenza [Hz]			Ponderazione per le Accelerazioni [dB]			Ponderazione per le Velocità [dB]		
centrale	Estremo inferiore	Estremo superiore	Postura Longitudinale (asse z)	Postura Trasversale (asse x-y)	Postura non nota o Variabile	Postura Longitudinale (asse z)	Postura Trasversale (asse x-y)	Postura non nota o Variabile
1.00	0.89	1.12	-6.0	0.0	0.0	-24.0	-6.0	-15.0
1.25	1.12	1.41	-5.0	0.0	0.0	-21.0	-4.0	-13.0
1.60	1.41	1.78	-4.0	0.0	0.0	-18.0	-2.0	-11.0
2.00	1.78	2.24	-3.0	0.0	0.0	-15.0	0.0	-9.0
2.50	2.24	2.82	-2.0	-2.0	-0.5	-12.0	0.0	-7.5
3.15	2.82	3.55	-1.0	-4.0	-1.0	-9.0	0.0	-6.0
4.00	3.55	4.47	0.0	-6.0	-1.5	-6.0	0.0	-4.5
5.00	4.47	5.62	0.0	-8.0	-2.0	-4.0	0.0	-3.0
6.30	5.62	7.08	0.0	-10.0	-2.5	-2.0	0.0	-1.5
8.00	7.08	8.91	0.0	-12.0	-3.0	0.0	0.0	0.0
10.00	8.91	11.22	-2.0	-14.0	-5.0	0.0	0.0	0.0
12.50	11.22	14.13	-4.0	-16.0	-7.0	0.0	0.0	0.0
16.00	14.13	17.78	-6.0	-18.0	-9.0	0.0	0.0	0.0
20.00	17.78	22.39	-8.0	-20.0	-11.0	0.0	0.0	0.0
25.00	22.39	28.18	-10.0	-22.0	-13.0	0.0	0.0	0.0
31.50	28.19	35.48	-12.0	-24.0	-15.0	0.0	0.0	0.0
40.00	35.48	44.67	-14.0	-26.0	-17.0	0.0	0.0	0.0
50.00	44.67	56.23	-16.0	-28.0	-19.0	0.0	0.0	0.0
63.00	56.24	70.79	-18.0	-30.0	-21.0	0.0	0.0	0.0
80.00	70.80	89.12	-20.0	-32.0	-23.0	0.0	0.0	0.0



I valori limite sono differenziati per tipologia insediativa, per tipo di segnale (durata, caratteristiche) e per asse di sollecitazione. Per valori di sollecitazione vibratoria costante e non costante (dove per quest'ultima viene richiesta un'integrazione dei valori misurati), i valori limite sono riportati nella seguente tabella.

Classe	Destinazione d'uso del territorio	Livello L_{eff} [dB] (°)			Accelerazione A_{eff} [mm/s²]			Velocità V_{eff} [μm/s]		
		L (z)	T (x-y)	V (x-y-z)	L (z)	T (x-y)	V (x-y-z)	L (z)	T (x-y)	V (x-y-z)
I	Aree critiche (1)	74	71	71	5,0	3,6	3,6	100	280	100
II	Abitazioni (notte)	77	74	74	7,0	5,0	5,0	140	400	140
III	Abitazioni (giorno)	80	77	77	10,0	7,2	7,2	200	560	200
IV	Uffici	86	83	83	20,0	14,4	14,4	400	1.100	400
V	Fabbriche	92	89	89	40,0	28,8	28,8	800	2.200	800

L componente longitudinale (riferita alla spina dorsale dell'uomo) .....(Asse z)
T componente trasversale (riferita alla spina dorale dell'uomo) .....(Assi x-y)
V nel caso di postura variabile o non nota .....(Assi x-y-z)
(°) 0 dB ≅ 1 μm/s² (10^{-6} m/s²)

(1) Per aree critiche si intendono edifici particolarmente sensibili alle vibrazioni, quali ad es. laboratori metrologici, fabbricati industriali contenenti apparecchiature sensibili alle vibrazioni (microscopi elettronici…).

La UNI 9614:1990 definisce tre tipologie di segnali vibratori:

- vibrazioni di livello costante;
- vibrazioni di livello non costante;
- vibrazioni impulsive.

Il segnale vibratorio prodotto dalle vibrazioni stradali può essere considerato come una vibrazione di livello non costante e dunque per tale tipologia di segnale la valutazione deve avvenire su un "intervallo di tempo rappresentativo" dell'evento (app. A.2 norma UNI 9614).

Su tale intervallo è possibile effettuare due tipi di valutazioni: nel caso in cui si scelga un approccio maggiormente cautelativo si può operare sul massimo valore raggiunto durante l'evento del transito, mentre in alternativa si può lavorare sul concetto di media energetica sulla durata dell'evento.

In generale, la valutazione delle vibrazioni negli studi, sono eseguite sul valore medio del valore efficace (RMS) della vibrazione su un intervallo equivalente alla durata dell'evento di transito.

Per quanto riguarda la direzione del rilievo la norma UNI 9614 prescrive di eseguire i rilievi "lungo i tre assi ortogonali o secondo l'asse lungo il quale le vibrazioni sono più elevate". Negli studi è considerata la seconda ipotesi, di applicare la ponderazione asse Z all'asse verticale e la ponderazione X-Y per gli assi orizzontali. I limiti applicabili saranno pertanto:

Direzione Asse	Soglia di percezione Law (dB)	Limite di accettabilità per abitazioni Law (dB)	Limite di accettabilità per uffici Law (dB)
Asse Z	74	77	86
Assi X-Y	71	74	83

In riferimento alla UNI 9614:2017, essendo essa presa a rifermento nello studio, si riporta di seguito la descrizione dettagliata della norma.

Nel settembre 2017, dopo una lunga fase preparatoria, è stato emanato l'aggiornamento della norma UNI 9614:1990. L'aggiornamento si è reso necessario per mettere a punto un approccio più moderno alla valutazione del disturbo da vibrazioni e per tenere conto dei progressi delle tecniche di misura e della normativa internazionale vigente.

La norma, come già illustrato, riguarda il metodo di misurazione delle vibrazioni immesse negli edifici ad opera di sorgenti interne o esterne agli edifici ed i criteri di valutazione del disturbo delle persone all'interno degli edifici stessi. La nuova versione della norma modifica in modo sostanziale la vecchia, introducendo un approccio innovativo per le modalità di valutazione dei disturbi da vibrazioni, facendo riferimento alla norma ISO 2631.2:2003 per i metodi di misura e valutazione, ed alla norma norvegese NS 8176.E.

La norma è applicabile a tutti i fenomeni che possono originare vibrazioni negli edifici, come, ad esempio, traffico su gomma o su rotaia, attività industriali o di specifici macchinari, attività di cantiere, esplosioni, ecc.; non è invece applicabile a vibrazioni derivanti da fenomeni sismici, alla valutazione di danni strutturali, architettonici o "cosmetici" agli edifici, per la quale esistono altre norme di riferimento, all'esame di problematiche connesse all'igiene sul lavoro, o alle attività di manutenzione preventiva/predittiva di macchinari o di influenza su strumenti particolarmente sensibili. Non si applica inoltre a casi di frequenze vibrazionali inferiori al terzo di banda d'ottava centrato a 1 Hz.

Anzitutto la nuova norma 9614:2017 distingue i tipi di sorgenti in base a:

- posizione: interna o esterna agli edifici;
- funzione: per sorgenti legate ad "attività essenziali" di pubblico servizio, per le quali un'eventuale disattivazione potrebbe generare un'interruzione di pubblico servizio con danni a persone, cose o attività, possibili pericoli o problemi di ordine pubblico, ecc. (ospedali, gasdotti, elettrodotti, acquedotti, ecc.); per sorgenti legate ad "attività non interrompibili", per le quali non è possibile, a meno di interventi di manutenzione programmata o straordinaria, interrompere in tempi rapidi l'attività senza produrre danni o pericoli o alterazioni di prodotto (sorgenti industriali e/o a ciclo

continuo, impianti di produzione/distribuzione di energia, sistemi di trasporto pubblico); per sorgenti "di altra natura";

- caratteristiche di durata delle vibrazioni prodotte: per sorgenti continue o semi-continue (impianti industriali); per sorgenti intermittenti presenti per gran parte della giornata (strade, metropolitane, ferrovie); per sorgenti intermittenti presenti per una parte limitata della giornata (ascensori interni a un edificio); per sorgenti temporanee presenti per gran parte della giornata (cantieri); per sorgenti temporanee presenti per una parte limitata del giorno.

La classificazione di cui sopra viene proposta come descrittore univoco per l'identificazione dei fenomeni.

Le misure devono essere eseguite dopo un'analisi accurata dei fenomeni osservati, condotta sulla base degli aspetti legati alla tipologia di sorgente e di edificio ed alle posizioni dei recettori e relativi tempi di permanenza.

La grandezza cinematica di riferimento rappresentativa del disturbo è individuata nell'accelerazione assoluta, che necessita di una misura diretta per mezzo di sensori accelerometrici, con misura simultanea sui tre assi ortogonali di riferimento per la struttura dell'edificio o del corpo umano (per convenzione: asse Z verticale).

Le postazioni di misura vanno individuate sulla base delle reali condizioni di utilizzo degli ambienti da parte degli abitanti, escludendo quindi eventuali ambienti di servizio (ripostigli, servizi igienici, cantine, solai, corridoi, giardini, vie di accesso, balconi/terrazzi, scale, pianerottoli e ambienti non abitabili secondo le vigenti normative indipendentemente dal loro reale uso). Le misure per la valutazione del disturbo alla persona vanno eseguite, in generale, sui pavimenti o, in subordine, su elementi strutturali che possono essere a diretto contatto con il corpo umano durante la normale attività all'interno dell'ambiente o su superfici di appoggio per mobili utilizzati per il riposo, ma non su soffitti, controsoffitti, mensole, vetrate, suppellettili, mobili, letti e arredi in generale. Vanno anche evitate posizioni di misura su superfici a scarsa aderenza con le strutture (piastrelle non aderenti al massetto), morbide e/o cedevoli (tappeti, moquette, ecc.) o per le quali l'ampiezza delle vibrazioni può derivare anche da cattivo stato di manutenzione. Ovviamente i punti di misura devono essere individuati nei punti ove si rileva il più elevato dei valori efficaci di accelerazione ponderata aw(t), ma lontano da eventuali punti singolari. La seguente figura mostra alcune possibili individuazioni di punti di misura adeguati o non adeguati alle valutazioni oggetto della norma in esame.

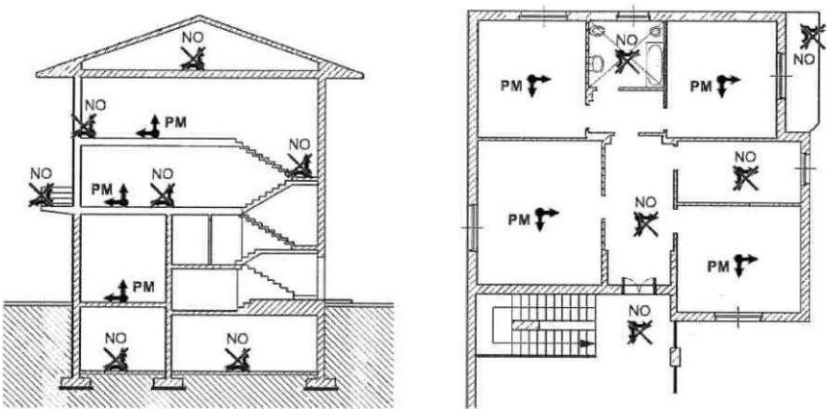


Figura 2-1 - Individuazione corretta e non corretta dei punti di misura

La durata complessiva delle misure dipende dal numero di eventi necessario ad assicurare una ragionevole accuratezza statistica delle misure, tenendo conto sia della variabilità della sorgente che della natura dell'ambiente di misura. Se l'esposizione è prodotta da fenomeni di diverso tipo presenti in diversi periodi, è necessario procedere con un'analisi separata per ciascun periodo. L'appendice A della norma fornisce criteri generali per l'individuazione degli eventi da prendere in considerazione nel caso di fenomeni connessi a traffico tramviario o stradale, attività di cantiere, sorgenti industriali, attività umane dirette e vibrazioni stazionarie ed ergodiche. Per le misure, resta comunque fondamentale la verifica dell'effettiva ed esaustiva rappresentatività della situazione in esame.

La norma fornisce comunque indicazioni generali sul numero minimo consigliato di eventi da prendere in considerazione per i singoli casi:

- per fenomeni caratterizzati da un elevato numero di eventi distinti: almeno 15 eventi;
- per fenomeni generati da attività umane dirette con eventi distinguibili: almeno 25 eventi;
- per fenomeni stazionari, ergodici o assimilabili che non danno luogo ad eventi distinti (attività industriali o attività umane dirette con eventi non facilmente distinguibili): almeno 25 eventi;
- per fenomeni caratterizzati da un ridotto numero di eventi si possono eseguire misurazioni anche in giorni diversi per acquisire complessivamente i segnali relativi ad almeno 5 eventi;
- gli eventi molto rari (indicativamente con occorrenza inferiore a un evento ogni due settimane) sono considerati "non disturbanti" ai fini della UNI 9614:2017, in virtù della loro scarsa incidenza temporale.

Per la determinazione del presunto disturbo vibrazionale generato da una specifica sorgente devono essere misurate sia le vibrazioni immesse che quelle residue. Le vibrazioni residue vanno misurate nello stesso punto e con le stesse modalità e criteri utilizzati per le vibrazioni immesse, considerando ricomprese nella componente residua le vibrazioni eventualmente rilevate in ambiente lavorativo e connesse all'attività produttiva o agli impianti al suo servizio.

Nel caso di sorgenti continue classificabili come attività essenziali di pubblico servizio, non è ovviamente possibile la misura delle vibrazioni residue, rendendo accettabile la misura delle sole vibrazioni immesse, ma mantenendo la possibilità di eseguire rilievi di vibrazioni residue in occasione di fermi per manutenzioni programmate o nel corso di fasi di ridotta attività, al fine di ottenere almeno una stima della componente vibrazionale residua. Per le attività non interrompibili, ma non essenziali, la misura delle vibrazioni residue è invece richiesta mediante una disattivazione programmata delle sorgenti, previa una valutazione preliminare cautelativa della significatività delle vibrazioni residue stesse e del loro peso rispetto alle vibrazioni immesse. Per sorgenti semi-continue, intermittenti o temporanee la misura delle vibrazioni residue è invece obbligatoria.

La strumentazione da utilizzare per la valutazione del disturbo da vibrazioni deve permettere, oltre che l'acquisizione e la registrazione del segnale accelerometrico, anche l'elaborazione in linea dei dati. È accettato anche l'uso di sistemi di acquisizione dati con memorizzazione digitale della storia temporale accelerometrica

con successiva post elaborazione off-line mediante specifico software, dandone esplicita indicazione, rispondente comunque alle caratteristiche di analisi richieste dalla UNI EN ISO 8041-1.

Le caratteristiche metrologiche della catena di misura (curva di risposta in frequenza, dinamica del sistema di acquisizione, rumore di fondo, filtri "band limiting", ponderazione Wm, ecc.) devono essere conformi alla UNI EN ISO 8041-1.

In particolare, si devono rispettare i seguenti requisiti:

- sensibilità nominale non inferiore a 10mV/(m/s^2);
- risposta in frequenza della catena di misura, comprensiva dell'acquisizione, lineare con tolleranza ±5% da 0.5 Hz a 250 Hz;
- acquisizione digitale con frequenza di campionamento non minore di 1500 Hz, presenza di filtro anti-aliasing con frequenza non minore di 600 Hz, risoluzione preferenziale di 24 bit e minima di 16 bit;
- valore efficace del rumore strumentale, dovuto a fenomeni casuali e non dipendenti né dalle vibrazioni immesse né da quelle residue, almeno cinque volte inferiore al minimo valore efficace dei segnali da misurare.

Il montaggio degli accelerometri deve essere tale da garantire la trasmissione rigida del moto dal sistema vibrante all'accelerometro almeno della banda 0-500 Hz e deve essere eseguito facendo riferimento alla norma UNI ISO 5348 o secondo le indicazioni fornite dal produttore del sensore. Le modalità di installazione devono essere riportate nel rapporto di misura e devono essere scelte in relazione alle condizioni dei piani di posa, prevedendo eventualmente l'utilizzo, anche contemporaneo, di inserti/tasselli (meccanici o chimici) inseriti nel piano di posa, collaggi rigidi (mastici, resine, cera d'api), magneti, collegamenti bullonati o masse appoggiate isostaticamente sulle superfici alle quali è vincolato l'accelerometro (configurazione non concessa per superfici morbide o irregolari). Il corretto funzionamento della catena di misura deve essere verificato prima e dopo ogni misura mediante apposito calibratore a norma UNI EN ISO 8041-1; sono ammessi calibratori a frequenza fissa pari a 1000 rad/s ed ampiezza di 10m/s^2. Ogni tre anni l'intera catena di misura deve essere sottoposta a verifica di taratura.

La strumentazione di misura deve infine garantire l'acquisizione del segnale con riferimento alle specifiche di cui al punto 6 della norma UNI 11568:2015.

Per l'elaborazione delle misure ed il calcolo dei parametri del disturbo, la norma UNI 9614:2017 suggerisce un metodo sequenziale valido per tutti i tipi di sorgente e adeguato a coprire sia fenomeni di media e breve durata, sia fenomeni impulsivi caratterizzati da un fattore di cresta molto elevato.

L'elaborazione del segnale corrispondente ad ogni singolo evento monitorato comporta i seguenti passaggi:

1. filtraggio con filtro passa banda e con filtro di ponderazione: l'accelerazione rilevata sui tre assi $a_x(t)$, $a_y(t)$ e $a_z(t)$ viene preliminarmente filtrata con un filtro passa banda ("band limiting"), con specifiche funzioni di trasferimento (§ punto 8.1.1 della norma), al fine di selezionare le frequenze significative per la risposta del corpo umano al disturbo. Successivamente si applica un filtro di ponderazione in frequenza che utilizza la curva W_m definita dalla ISO 2631-2, anch'esso con una specifica funzione di

trasferimento (§ punto 8.1.2 della norma). Al termine del procedimento di filtraggio si ottiene per il j-esimo asse, l'accelerazione ponderata $a_{wj}(t)$;

2. calcolo del valore efficace dell'accelerazione assiale ponderata: per l'intera storia temporale del segnale ponderato, viene calcolato, secondo quanto indicato dalla norma UNI EN ISO 8041-1:2017 al punto D.1, l'andamento nel tempo del valore efficace dell'accelerazione ponderata, in riferimento a ciascun asse cartesiano, e per un intervallo di integrazione T = 1 s, secondo la seguente formulazione:

$$a_{w,rms,j}(t) = \left(\frac{1}{\tau}\, x \int_{t-\tau}^{t} a_{w,j}^2(\,t\,)\, x\; dt\right)$$

3. calcolo dell'accelerazione ponderata totale efficace: viene eseguito per combinazione (secondo UNI ISO 2631-1:1997, punto 6.5, con $k_x=k_y=k_z=1$), istante per istante, a partire dalle tre accelerazioni assiali ponderate calcolate in precedenza secondo la seguente relazione:

$$a_w(t) = \sqrt{a_{w,rms,x}^2(t) + a_{w,rms,y}^2(t) + a_{w,rms,z}^2(t)}$$

Le precedenti tre fasi di calcolo sono riassunte nella seguente figura.

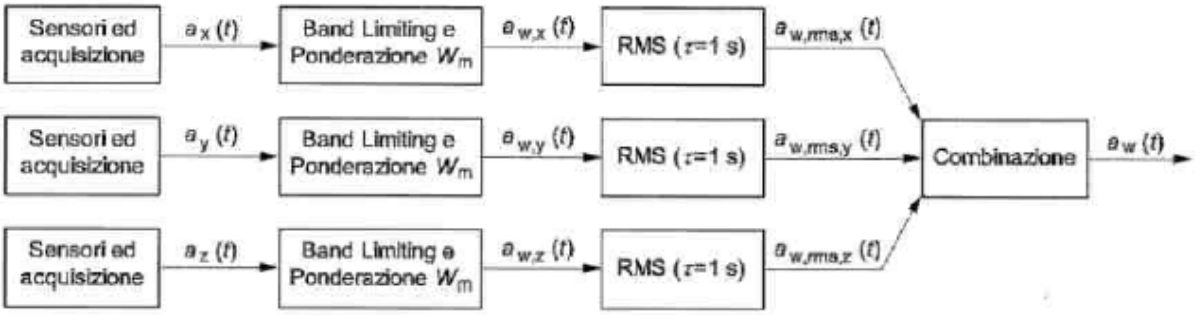


Figura 2-2 - Schema di calcolo dell'accelerazione ponderata efficace secondo la UNI 9614:2017

Dall'accelerazione ponderata efficace $a_w(t)$, si possono poi ottenere le seguenti grandezze:

a) massima accelerazione ponderata, definita come il massimo livello di accelerazione ponderata efficace all'interno del singolo evento j-esimo, ovvero:

$$a_{w,max,j} = \max\,(a_w(t))$$

b) massima accelerazione statistica $a_{w,95}$ data dalla seguente relazione:

$$a_{w,95} = \overline{a_{w,max}} + 1{,}8\, x\, \sigma$$

dove:

$\overline{a_{w,max}}$ è il valore medio della massima accelerazione ponderata calcolato come media aritmetica delle massime accelerazioni ponderate $a_{w,max,j}$ con j che rappresenta gli eventi considerati, ovvero:

$$\overline{a_{w,max}} = \frac{\sum_{j=1}^{N} a_{w,max,j}}{N}$$

s è lo scarto tipo della distribuzione delle massime accelerazioni ponderate $a_{w,max,j}$ calcolate mediante la seguente relazione:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N}\left(a_{w,max,j} - \overline{a_{w,max}}\right)^2}{N-1}}$$

Nel caso in cui non sia possibile misurare più di 5 eventi, non si ritiene attendibile $a_{w,95}$ così ottenuto, ed esso deve quindi essere stimato mediante la più elevata delle massime accelerazioni ponderate $a_{w,max,j}$ relative agli N eventi misurati.

Inoltre, è possibile determinare anche le vibrazioni associate ad una specifica sorgente ritenuta fonte di disturbo mediante l'accelerazione ponderata massima statistica della sorgente, V_{sor}, da calcolare a partire dall'accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni immesse, V_{imm}, e dall'accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni residue, V_{res}, secondo la seguente relazione:

$$V_{sor} = \sqrt{V_{imm}^2 - V_{res}^2}$$

Per la determinazione del vero valore del parametro $a_{w,95}$ si utilizza un procedimento di misure ripetute di vibrazioni su edifici, misure, per loro stessa natura, soggette, in generale, ad indeterminazione statistica derivante da incertezza strumentale, da quella relativa alla scelta delle postazioni di misura e da quella legata alla natura ed alle caratteristiche di variabilità del fenomeno in esame; dunque, anche $a_{w,95}$ sarà un parametro soggetto ad indeterminazione.

L'incertezza strumentale e quella legata alla scelta delle posizioni di misura sono ben caratterizzate nella UNI 9614:2017 e, per questo, sono in generale meno importanti dell'indeterminazione connessa alle specifiche caratteristiche del fenomeno vibratorio in esame. Di conseguenza le incertezze globali delle determinazioni sono influenzate principalmente dall'incertezza sulle caratteristiche del fenomeno e quindi dalla natura della sorgente, dalle modalità di generazione e di rilascio di energia vibrazionale e dalla proprietà fisico-meccaniche del mezzo entro il quale si propaga il fenomeno vibratorio, proprietà eventualmente anche variabili nel tempo.

In generale è quindi pressoché impossibile fornire indicazioni quantitative sull'incertezza del fenomeno vibratorio ed è quindi necessario valutare la dispersione dei dati mediante induzione motivata o esecuzione di misure in periodi diversi.

Ovviamente una significativa riduzione dell'indeterminazione può essere ottenuta con l'incremento del numero di eventi analizzati anche oltre le indicazioni fornite, in generale, dalla UNI 9614:2017 (punto 6.3).

Una volta determinato il parametro descrittore della vibrazione di una sorgente, V_{sor}, è possibile confrontare i suoi valori con specifici limiti di disturbo caratteristici di diversi tipi di ambienti e di diversi periodi della

giornata. Ad esempio, per ambienti ad uso abitativo, i limiti di riferimento massimi per la massima accelerazione ponderata della sorgente, V_{sor}, sono:

- periodo diurno: 7.2 mm/s^2;
- periodo notturno: 3.6 mm/s^2;
- periodo diurno di giornate festive: 5.4 mm/s^2;

Il seguente schema riepiloga i limiti di riferimento individuati dalla norma UNI 9614:2017 per particolari ambienti diversi da quello residenziale/abitativo.

- ambienti di lavoro (1) V_{sor} = 14 mm/s^2;
- ospedali, case di cura ed affini (2) V_{sor} = 2 mm/s^2;
- asili e case di riposo (3) V_{sor} = 3,6 mm/s^2;
- scuole (4) V_{sor} = 5,4 mm/s^2;

Note:

(1) limiti indicati fermi restando gli obblighi derivanti dalla protezione dei lavoratori ex D.Lgs. 81/08 e s.m.i, e riferendosi a vibrazioni immesse da sorgenti esterne e non connesse alle attività (le vibrazioni connesse alle attività produttive fanno parte della componente residua V_{res});
(2) limiti validi indipendentemente dall'orario, per degenze ordinarie, e con misure effettuate al pavimento in corrispondenza del letto dei pazienti;
(3) limiti validi anche in orario diurno, limitatamente ai periodi effettivamente utilizzati per il riposo diurno (prime ore del pomeriggio);
(4) limiti validi per il periodo di effettivo utilizzo da parte degli allievi e limitatamente alle aule didattiche.

Nel caso in cui le vibrazioni residue, V_{res}, avessero un valore maggiore del 50% di quelle immesse, V_{imm}, il disturbo prodotto dalle vibrazioni della sorgente, V_{sor}, può essere ritenuto trascurabile.

Di seguito la tabella di sintesi dei limiti previsti dalla UNI 9614:2017.

Destinazione d'uso	**Accelerazione Vettore V_{sorg} (m/s^2)**
Abitazioni (periodo notturno dalle 22:00 alle 6:00)	$3,6 \times 10^{-3}$
Abitazioni (periodo diurno dalle 6:00 alle 22:00)	$7,2 \times 10^{-3}$
Abitazioni (periodo diurno festivo dalle 6:00 alle 22:00)	$5,4 \times 10^{-3}$
Luoghi di lavoro	14×10^{-3}
Ospedali, case di cura e affini (indipendentemente dal periodo)	2×10^{-3}
Asili e case di riposo (valido anche nel periodo diurno in caso sia previsto il riposo delle persone)	$3,6 \times 10^{-3}$
Scuole (nel periodo di utilizzo degli allievi e limitatamente alle aule usate)	$5,4 \times 10^{-3}$

Tab. 2.1 - Valori limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza per la UNI 9614:2017

2.1.3 UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici"

I danni agli edifici determinati dalle vibrazioni vengono trattati dalla UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici", norma in sostanziale accordo con i contenuti tecnici della ISO 4866 e in cui viene richiamata, sebbene non faccia parte integrante della norma, la DIN 4150, parte 3.

La norma UNI 9916 fornisce una guida per la scelta di appropriati metodi di misura, di trattamento dei dati e di valutazione dei fenomeni vibratori allo scopo di permettere anche la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica. Altro scopo della norma è di ottenere dati comparabili sulle caratteristiche delle vibrazioni rilevate in tempi diversi su uno stesso edificio, o su edifici diversi a parità di sorgente di eccitazione, nonché di fornire criteri di valutazione degli effetti delle vibrazioni medesime.

La norma considera per semplicità gamme di frequenza variabili da 0.1 a 150 Hz. Tale intervallo interessa una grande casistica di edifici e di elementi strutturali di edifici sottoposti ad eccitazione naturale (vento, terremoti, ecc.) nonché ad eccitazioni causate dall'uomo (traffico, attività di costruzione, ecc.). In alcuni casi l'intervallo di frequenza delle vibrazioni può essere più ampio; tuttavia, le eccitazioni con contenuto in frequenza superiore a 150 Hz non sono tali da influenzare significativamente la risposta dell'edificio. L'Appendice A della UNI 9916 contiene una guida semplificata per la classificazione degli edifici secondo la loro probabile reazione alle vibrazioni meccaniche trasmesse attraverso il terreno. Nell'ambito di questa classificazione, un sistema dinamico è costituito dal terreno e dallo strato di base (magrone) sul quale si trovano le fondazioni oltre che la struttura medesima dell'edificio.

Le strutture comprese nella classificazione riguardano:

- tutti gli edifici residenziali e gli edifici utilizzati per le attività professionali (case, uffici, ospedali, case di cura, ecc.);
- gli edifici pubblici (municipi, chiese, ecc.);
- edifici vecchi ed antichi con un valore architettonico, archeologico e storico;
- le strutture industriali più leggere spesso concepite secondo le modalità costruttive in uso per gli edifici abitativi.

La classificazione degli edifici (Prospetto III) è basata sulla loro resistenza strutturale alle vibrazioni oltre che sulla tolleranza degli effetti vibratori sugli edifici in ragione del loro valore architettonico, archeologico e storico. I fattori dai quali dipende la reazione di una struttura agli effetti delle vibrazioni sono:

- la categoria della struttura;
- le fondazioni;
- la natura del terreno.

La categoria di struttura (Prospetto II) è classificata in una scala da 1 a 8 (a numero crescente di categoria corrisponde una minore resistenza alle vibrazioni) in base ad una ripartizione in due gruppi di edifici, edifici vecchi e antichi o strutture costruite con criteri tradizionali (Gruppo 1) e edifici e strutture moderne (Gruppo 2). L'associazione della categoria viene fatta risalire alle caratteristiche tipologiche e costruttive della costruzione e al numero di piani.

Le fondazioni sono classificate in tre classi. La Classe A comprende fondazioni su pali legati in calcestruzzo armato e acciaio, platee rigide in calcestruzzo armato, pali di legno legati tra loro e muri di sostegno a gravità; la Classe B comprende pali non legati in calcestruzzo armato, fondazioni continue, pali e platee in legno; la Classe C infine comprende i muri di sostegno leggeri, le fondazioni massicce in pietra e la condizione di assenza di fondazioni, con muri appoggiati direttamente sul terreno.

Il terreno viene classificato in sei classi: rocce non fessurate o rocce molto solide, leggermente fessurate o sabbie cementate (Tipo a); terreni compattati a stratificazione orizzontale (Tipo b); terreni poco compattati a stratificazione orizzontale (Tipo c); piani inclinati, con superficie di scorrimento potenziale (Tipo d); terreni granulari, sabbie, ghiaie (senza coesione) e argille coesive sature (Tipo e) e materiale di riporto (Tipo f).

L'Appendice B della UNI 9916 contiene i criteri di accettabilità dei livelli delle vibrazioni con riferimento alla DIN 4150 e al Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 24 gennaio 1986 "Norme tecniche relative alle costruzioni in zona sismica." La parte 3 della DIN 4150 indica le velocità massime ammissibili per vibrazioni transitorie:

- sull'edificio (nel suo complesso);
- sui pavimenti: v < 20 mm/s in direzione verticale nel punto di massima vibrazione e le velocità massime ammissibili per vibrazioni stazionarie;
- sull'edificio (nel suo complesso): v < 5 mm/s in direzione orizzontale sull'ultimo piano;
- sui pavimenti: v < 10 mm/s in direzione verticale nel punto di massima vibrazione.

Per velocità massima è da intendersi la velocità massima di picco. Essa è ricavabile dalla velocità massima r.m.s. attraverso la moltiplicazione di quest'ultima con il fattore di cresta F. Tale parametro esprime il rapporto tra il valore di picco e il valore efficace. Per onde sinusoidali si assume F = 1.41; in altri casi si possono assumere valori maggiori. Nei casi più critici (ed es. esplosioni di mina) F può raggiungere il valore 6. La ISO 4866 fornisce infine una classificazione degli effetti di danno a carico delle strutture secondo tre livelli:

- Danno di soglia: formazione di fessure filiformi sulle superfici dei muri a secco o accrescimento di fessure già esistenti sulle superfici in gesso o sulle superfici di muri a secco; inoltre, formazioni di fessure filiformi nei giunti di malta delle costruzioni in muratura di mattoni. Possono verificarsi per vibrazioni di piccola durata, con frequenze maggiori di 4 Hz e velocità di vibrazione di 4÷50 mm/s, e per vibrazioni continue, con velocità 2÷5 mm/s.
- Danno minore: formazione di fessure più aperte, distacco e caduta di gesso o di pezzi di intonaco dai muri; formazione di fessure in murature di mattoni. Possono verificarsi per vibrazioni di piccola durata con frequenze superiori a 4 Hz nel campo di velocità vibrazionale compreso tra 20÷100 mm/s oppure per vibrazioni continue associate a velocità di 3÷10 mm/s.
- Danno maggiore: danneggiamento di elementi strutturali; fessure nei pilastri; aperture di giunti; serie di fessure nei blocchi di muratura. Possono verificarsi per vibrazioni di piccola durata con frequenze superiori a 4 Hz e velocità vibrazionale compresa tra 20÷200 mm/s oppure per vibrazioni continue associate a velocità di 5÷20 mm/s.

In considerazione dei valori nettamente inferiori dei limiti previsti della norma UNI 9614:2017 rispetto a quelli della norma UNI 9916:2014, si considera nella presente valutazione, che il rispetto dei limiti della norma UNI 9614:2017 implichi il conseguente rispetto anche dei limiti della norma UNI 9916:2014.

2.2 Linee Guida MASE D.D. VA n. 257 del 02/08/2024

Con **Decreto n. 257 del 02/08/2024** della Direzione Generale Valutazioni Ambientali, sono state adottare le Linee guida redatte dalla Commissione Tecnica di Verifica dell'Impatto Ambientale VIA e VAS, tese a indirizzare in modo specifico le istanze relative alla particolare tipologia di opere consistenti nei Data Center assistiti da gruppi elettrogeni di emergenza con potenza superiore complessivamente a 50 MWt.

L'obiettivo posto è stato di definire i principali aspetti in ordine a progetti di Data Center soggetti a valutazione ambientale, descrivendo le metodologie applicabili e chiarendo le modalità di adempimento degli obblighi previsti dalla normativa di settore.

2.3 Riferimenti bibliografici

Al fine della redazione del presente studio, per le assunzioni e comprovare le ipotesi tecniche assunte sono state prese in considerazione, oltre la corrente normativa tecnica richiamata, la seguente bibliografia:

- Angelo Farina – "Valutazione dei livelli di vibrazioni in edifici residenziali - Normativa, tecniche di misura e di calcolo" - Rivista Neo-EUBIOS, n. 16. Maggio 2006 - ISSN 1825-5515.
- Lamberto Tronchin, Angelo Farina, Valerio Tarabusi – "Studio di impatto acustico e vibrazionale nella realizzazione di infrastrutture viarie e ferroviarie" - 31° Convegno Nazionale AIA, Venezia, 5-7 Maggio 2004.
- Raffaele Pisani – "Origine, propagazione e modelli previsionali delle vibrazioni dei mezzi di trasporto", Convegno Nazionale Traffico e Ambiente Trento, 21 25 febbraio 2000.
- Hal Amick and Michael Gendreau (2000) – "Construction Vibrations and Their Impact on Vibration-Sensitive Facilities" - Colin Gordon & Associates, San Mateo, California 94402.
- Hal Amick, Colin Gordon & Associates (1999), "A Frequency-Dependent Soil Propagation Model" - Presented at SPIE Conference on Current Developments in Vibration Control for Optomechanical Systems - Denver, Colorado, July 20, 1999 San Mateo, California USA.
- Dong-Soo Kim, Jin-Sun Lee1 (1999), "Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations" - Department of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon – pp 305-701

- Ishihara, K. (1996). "Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics.", Oxford Science Publications, Oxford, UK, pp. 350.
- Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici – 1 ottobre 1992 di E. Carrara (Autore), Antonio Rapolla (Autore), N. Roberti (Autore)
- Aki, K., and Richards, P.G. (1980). "Quantitative Seismology: Theory and Methods.", W.H. Freeman and Company, San Francisco, 932 pp.
- Ohta, Y. and N. Goto. (1978), Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. Earthq. Eng. Struct. Dyn., 6:167-187.

3 INQUADRAMENTO DELL'AREA

3.1 Inquadramento territoriale

L'area di intervento è ubicata nel Comune di Treviglio, a circa 40 km da Milano e 27 km da Bergamo.

Il progetto, denominato LIN10, si trova nella zona sud-occidentale del Comune di Treviglio, in provincia di Bergamo (Italia), in Via della Costa 2.

Figura 3-1 Inquadramento territoriale (estratto Annex Constructability Assessment)

L'area di intervento del progetto LIN10 si trova nella zona sud-occidentale del Comune di Treviglio,

Figura 3-2 Localizzazione del Progetto

Il sito è ben collegato tramite l'autostrada "A35 BreBeMi" e si estende su una superficie di circa 153.626 mq, confinando con:

- La ferrovia a Nord;
- Le fabbriche a Est;
- Campi, fabbriche, fattorie e l'autostrada a Sud;
- Campi e alcune fattorie a Ovest.

Da un punto di vista dell'uso del suolo, il territorio circostante l'area di intervento presenta prevalentemente carattere agricolo, con superfici principalmente destinate a seminativi semplici, tipici del contesto della pianura lombarda. Localmente, tuttavia, l'area di progetto ricade all'interno dell'Area Industriale di Treviglio, classificata come "insediamenti industriali, artigianali e commerciali", e risulta circondata da reti stradali e spazi accessori, aree verdi incolte e cespuglieti in aree agricole abbandonate. Per quanto riguarda l'urbanizzazione residenziale, essa è costituita da agglomerati discontinui, limitati ai centri abitati dei comuni.

Di seguito è riportato l'inquadramento territoriale dell'area di intervento:

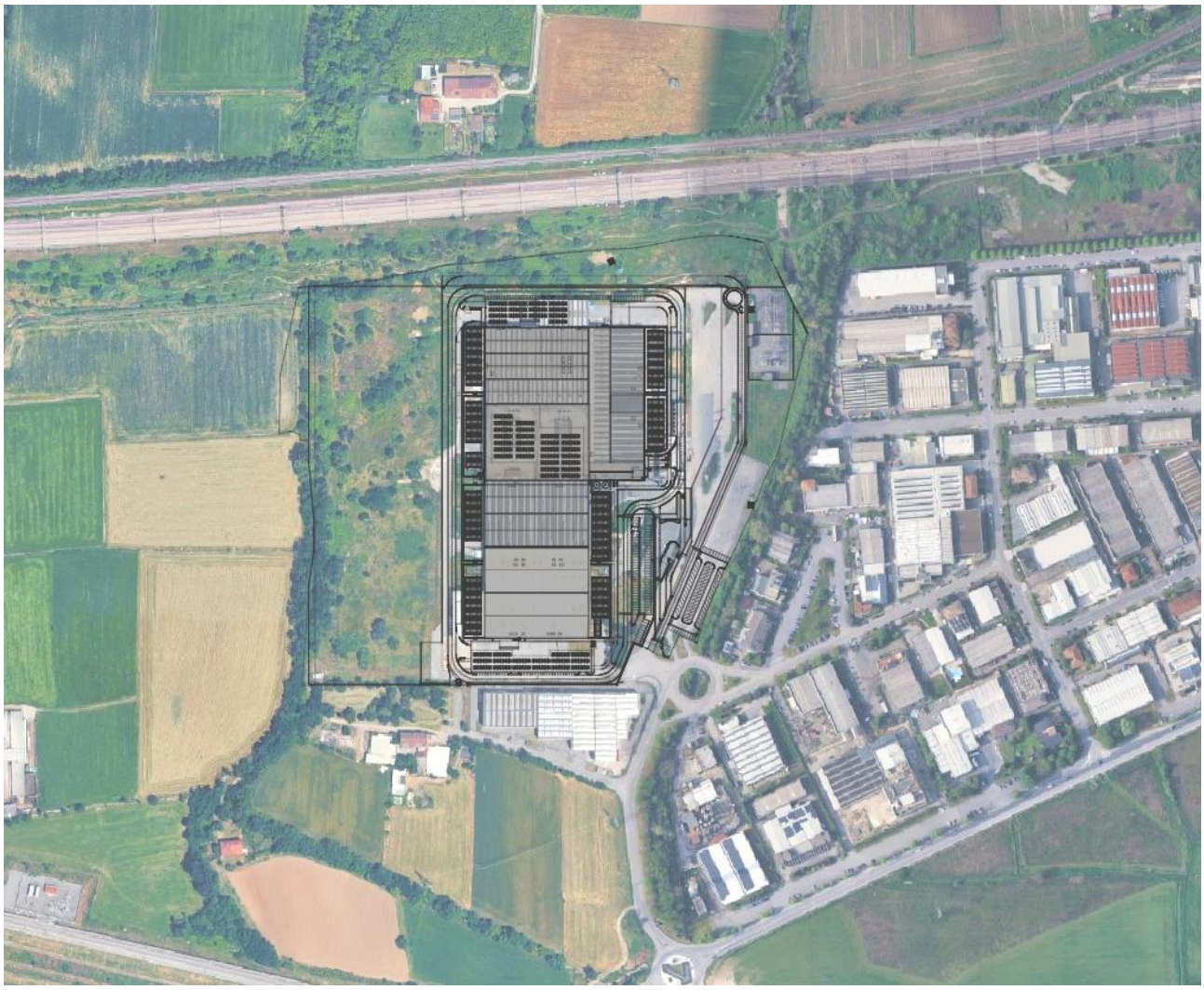


Figura 3-3 - Quadro territoriale dell'area di intervento

3.2 Individuazione dei ricettori

Ai fini della presente analisi sono stati individuati i ricettori ubicati nell'immediato intorno dell'area interessata dal progetto del Data Center "LIN 10", ritenuti rappresentativi delle principali destinazioni d'uso presenti nell'area di studio. I ricettori considerati coincidono con quelli individuati nell'ambito dello studio acustico, al fine di garantire coerenza e uniformità nell'individuazione dei recettori di riferimento per le diverse componenti ambientali oggetto di valutazione. Essi comprendono edifici con destinazione d'uso produttiva-commerciale e ricettori con destinazione d'uso residenziale.

Di seguito si riporta l'inquadramento territoriale dell'area oggetto di analisi, con la localizzazione dei ricettori individuati e l'indicazione della relativa tipologia d'uso.

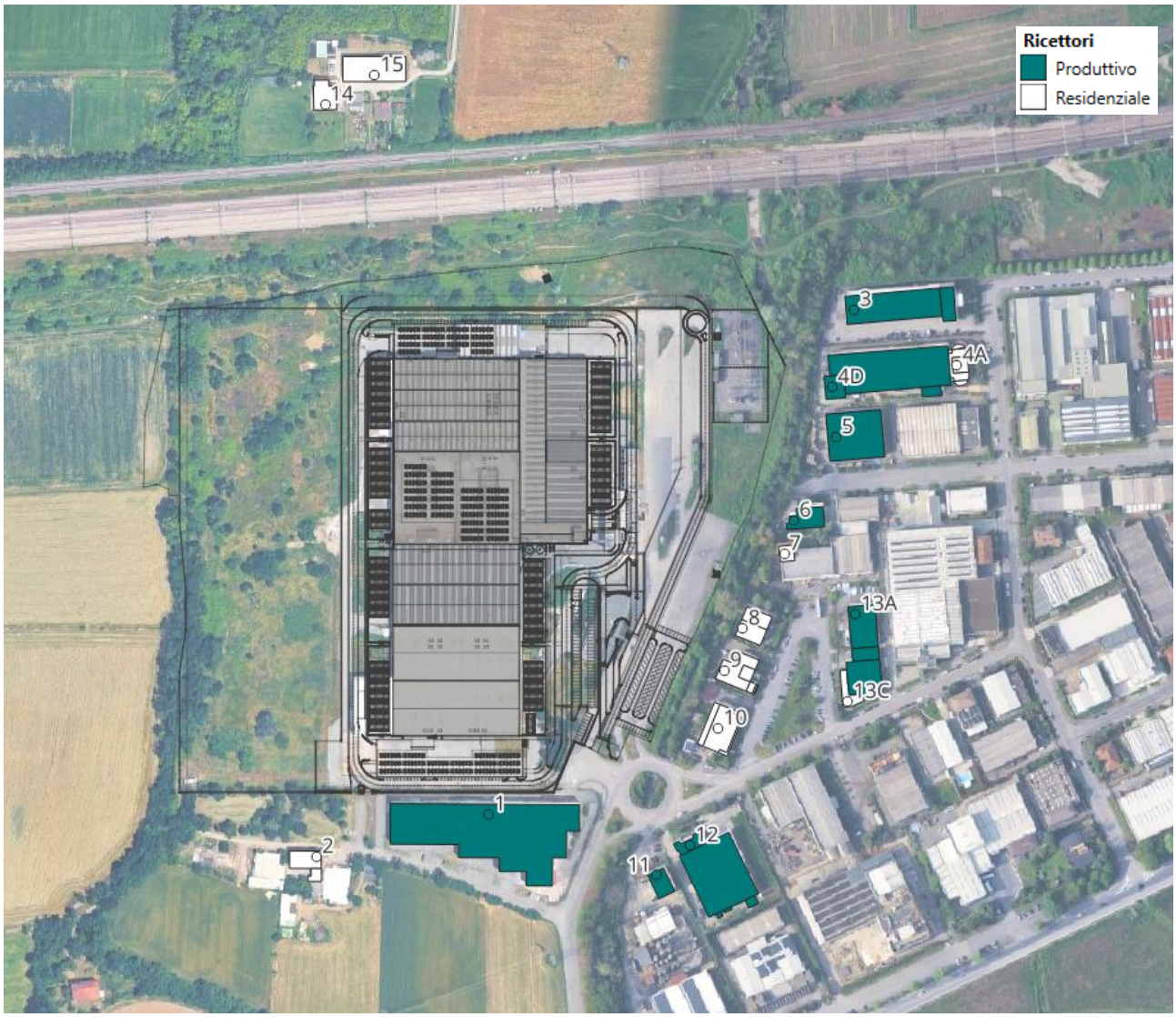


Figura 3-4 - Localizzazione dei recettori nell'area

3.3 Contesto geologico

Al fine di definire il contesto geologico di riferimento per la valutazione degli effetti vibrazionali, sia durante la fase di realizzazione dell'impianto sia nella successiva fase di esercizio, si riportano di seguito gli elementi conoscitivi derivanti dagli approfondimenti condotti nell'ambito degli studi geologici dell'area di intervento, come illustrati nell'elaborato specialistico "4210_ES V RGG 01 – Relazione Geologica e Geotecnica".

3.3.1 Inquadramento geologico e geomorfologico

Dal punto di vista geologico, il territorio comunale di Treviglio risulta interamente occupato da depositi sciolti costituiti da sedimenti grossolani, riferibili ad un ambiente deposizionale continentale di piana fluviale o fluvioglaciali (Pleistocene medio – Olocene). Queste deposizioni, legate alle fasi glaciali-interglaciali che si sono succedute nel Quaternario, hanno controllato l'assetto morfologico del territorio, portando alla formazione del cosiddetto "Livello Fondamentale della Pianura" (L.F.P. o Piano Generale Terrazzato) che, nell'area del trevigliese, si presenta come morfologicamente omogeneo e formato dall'aggradazione dei conoidi fluvioglaciali dell'Adda, del Brembo e del Serio in corrispondenza degli sbocchi vallivi.

Il "Livello Fondamentale della Pianura" identifica quindi un'unità fisiografica formata da sedimenti sciolti in superficie (ghiaie e sabbie con suoli profondi e ben sviluppati) e a volte cementati in profondità e delimitata, a est, dal Fiume Serio e, a ovest, dalla valle del Fiume Adda. In questa valle è possibile distinguere più terrazzi morfologici, ciascuno formato da depositi di età differente e posti a quote diverse.

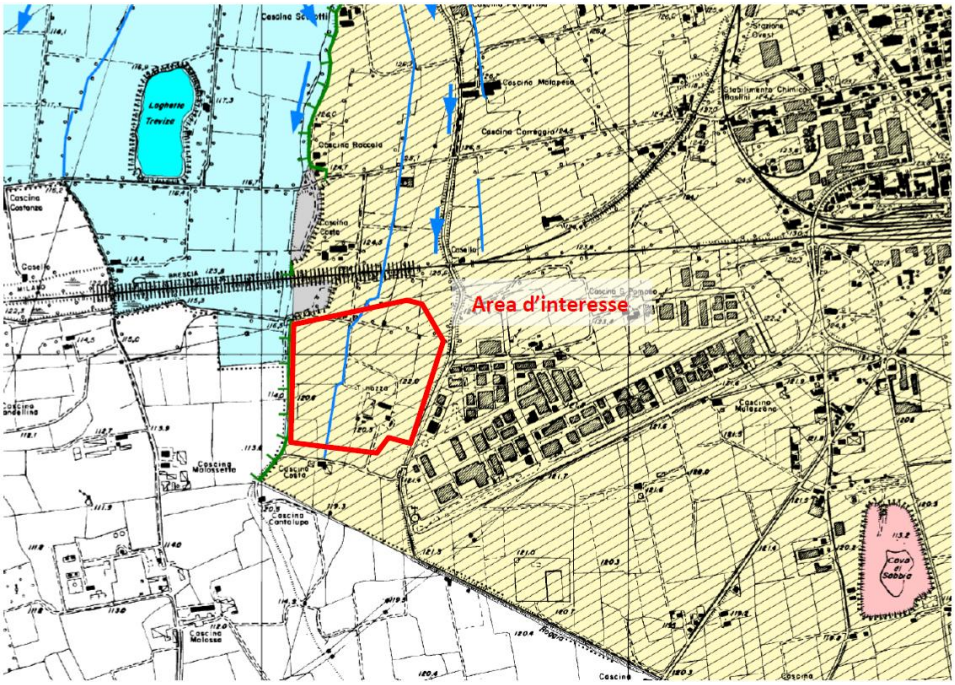
Dal punto di vista litologico, il "L.F.P." risulta individuato dall'*Unità di Cantù*, ascrivibile ai depositi del Bacino dell'Adda, e dall'*Unità di Treviglio*, di pertinenza del Complesso del Brembo. Il limite tra l'unità di Cantù ed i depositi alluvionali olocenici del fiume Adda (settore occidentale) risulta ben evidente e chiaramente individuabile su terreno per la presenza di una netta scarpata morfologica. Proprio in tale contesto si inserisce il sito di odierno interesse (Figura 3-5).

Di seguito si riporta la descrizione delle unità presenti in questo settore:

- **Unità Postglaciale** – Depositi Alluvionali Fiume Adda (Pleistocene superiore – Olocene): si tratta di depositi di natura prevalentemente ghiaioso-sabbiosa con occasionali eteropie verso terreni più fini (sabbie e limi). Costituiscono le alluvioni antiche del fiume Adda poste a contatto con i depositi fluvioglaciali; sono caratterizzati da variabilità sia per quanto riguarda le caratteristiche tessiturali sia relativamente ai suoli evoluti sulla superficie limite superiore;
- **Unità di Cantù - Complesso dell'Adda** – (Pleistocene medio - superiore): risulta rappresentata da depositi fluvioglaciali costituiti da ghiaie con ciottoli arrotondati a supporto di clasti e matrice in genere sabbiosa, e sabbie spesso a laminazione incrociata. L'unità di Cantù rientra nel bacino dell'Adda che rappresenta il conoide edificato dalle alluvioni dell'Adda connesse alla glaciazione wurmiana.

Dal punto di vista geomorfologico, il territorio comunale di Treviglio risulta nella sua maggioranza pressoché pianeggiante, con variazioni di modesta entità delle caratteristiche topografiche e morfologiche. Tale continuità risulta interrotta da un orlo di terrazzo, che si dispone nel settore occidentale con andamento

prevalentemente nord-sud: tale scarpata separa il ripiano morfologico principale (il cosiddetto "Livello Fondamentale della Pianura") con il bordo del sistema della valle del fiume Adda. Presenta un'altezza massima di circa 15m nel settore settentrionale e diminuisce passando da nord verso sud, dove raggiunge mediamente i 6-7 m.



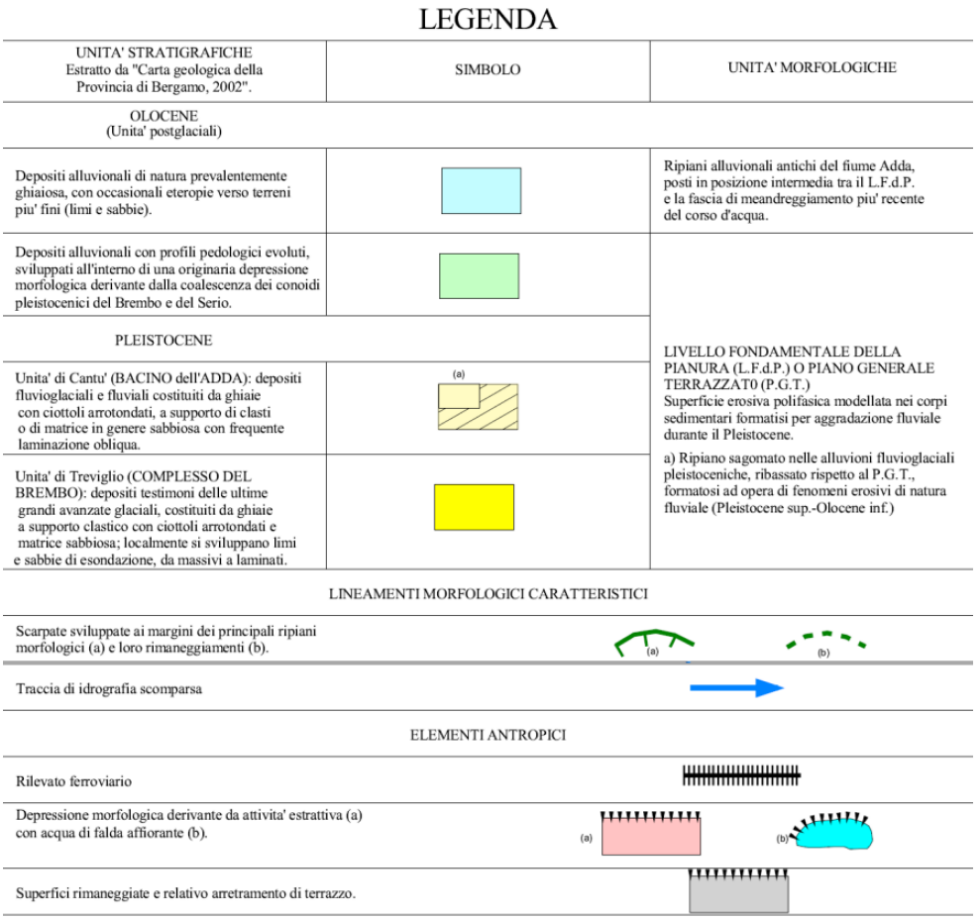


Figura 3-5 – Inquadramento geologico (stralcio Tav. 1 allegata alla Componente geologica comunale)

3.3.2 Caratterizzazione geologica e litostratigrafica del sito

Al fine di definire le caratteristiche geologiche e geotecniche di dettaglio del sito, il quadro conoscitivo è stato integrato mediante l'esecuzione di sondaggi a carotaggio continuo e prove penetrometriche statiche, che hanno consentito di definire il modello geologico-tecnico dell'area di intervento.

Le indagini hanno evidenziato che il sottosuolo è costituito da depositi fluvioglaciali caratterizzati da una successione pressoché monotona di ghiaie e sabbie, generalmente debolmente limose, con abbondanti ciottoli arrotondati di dimensioni variabili da centimetriche a decimetriche. Nell'ambito di tali depositi è presente una falda acquifera, il cui livello piezometrico è stato rilevato a una profondità di 11,7 m dal piano campagna (aprile 2025).

Dal punto di vista geologico-tecnico, il sito presenta una buona omogeneità sia laterale sia verticale, senza evidenza di significative variazioni litostratigrafiche nell'area di intervento.

3.3.3 Caratterizzazione del terreno ai fini della modellazione vibrazionale

In considerazione delle caratteristiche litostratigrafiche desunte dall'inquadramento geologico e dalle indagini geognostiche eseguite, l'area di studio e le aree limitrofe ai ricettori individuati risultano

caratterizzate da un contesto geologico sostanzialmente omogeneo, costituito da depositi fluvioglaciali a prevalente componente ghiaioso-sabbiosa, tipici della media pianura lombarda. Tali depositi presentano buona continuità litostratigrafica e un comportamento geomeccanico riconducibile a terreni granulari mediamente addensati.

Sulla base di tali caratteristiche, il terreno può essere assunto come sostanzialmente omogeneo dal punto di vista della risposta dinamica, sia ai fini della valutazione previsionale in fase di esercizio sia per la simulazione degli effetti vibrazionali associati alle attività di cantiere.

In termini modellistici, il mezzo viene pertanto ricondotto a una tipologia mediamente consistente di tipo consolidato (Classe II con $\rho < 1{,}5\times10^{-4}$; categoria C con $c = 300$ m/s; $\eta = 0{,}04$), parametri assunti nella presente valutazione per la simulazione della propagazione delle vibrazioni.

4 VALUTAZIONE DEL CLIMA VIBRAZIONALE ATTUALE

Al fine di determinare il livello vibrazionale residuo presente nell'area oggetto di studio, nel mese di agosto 2026 la società Ambiente S.r.l. ha condotto una campagna di misurazioni. In particolare, è stato effettuato un rilevamento della durata di 24 ore presso un edificio a uso misto commerciale e residenziale, identificato come ricettore R10.

Il punto di misura è stato individuato tra i ricettori residenziali più prossimi all'area di intervento. In ragione della sua collocazione e della vicinanza al sito di progetto, il ricettore R10 è stato ritenuto rappresentativo delle condizioni vibrazionali preesistenti nell'area e, più in generale, dei ricettori residenziali presenti nel suo intorno.

4.1 Monitoraggio vibrazionale

L'indagine vibrazionale ha permesso di caratterizzare l'attuale stato vibrazionale presso il ricettore individuato (R10), ritenuto rappresentativo del contesto territoriale in cui si colloca il progetto.

Le principali potenziali sorgenti di vibrazioni diffuse presenti nell'ambito di studio sono riconducibili alla viabilità a servizio degli insediamenti produttivi esistenti e alle relative attività produttive.

In particolare, si segnala la presenza di:

- Autostrada Brescia-Bergamo-Milano A35, nel tratto in prossimità dello svincolo di Treviglio;
- viabilità stradale locale a servizio dell'area industriale, caratterizzata dalla presenza di traffico leggero e di mezzi pesanti connessi alle attività produttive e logistiche presenti;
- linea ferroviaria AV/AC Milano-Verona, con il collegamento Treviglio-Brescia.

Le attività insediate nel contesto sono prevalentemente riconducibili a comparti produttivi di tipo industriale, artigianale e di servizi, con presenza localizzata di attività agricole legate alla coltivazione.

I dettagli della campagna sono riportati di seguito:

Tabella 4-1 - Dettaglio dei rilievi effettuati durante la campagna di misurazione di agosto 2026

Misura	Tipologia	Data	Ora Inizio	Ubicazione
VIB_01	24h	26/08/2026	10:00	Interno al ricettore R10

I risultati della campagna di misura sono riportati di seguito, sia in forma tabellare che grafica (storia temporale delle misure vibrometriche).

Tabella 4-2 - Risultati monitoraggio vibrometrico presso ricettore R11

Misura	Data	Periodo	Vres mm/s²	Vsorg mm/s²
VIB_01	26/08/2026	Diurno	0,1	0,3
		Notturno	0,1	0,3

L'ubicazione del punto di misurazione è illustrata nelle seguenti ortofoto e foto:

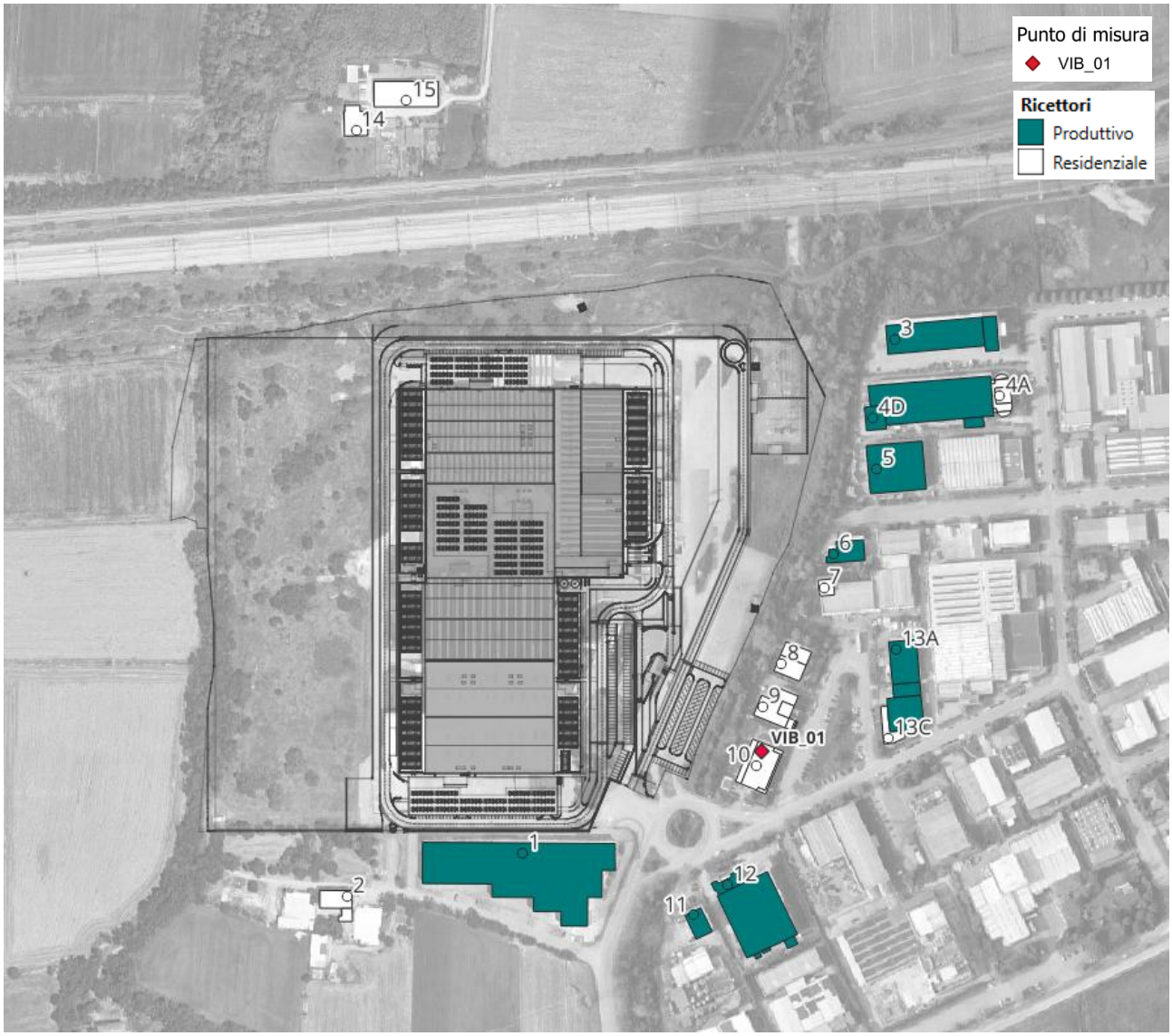


Figura 4-1 - Localizzazione dei recettori nell'area e postazione di misura

Figura 4-2 - Foto delle posizioni del punto di misurazione VIB_01

4.2 Confronto con i limiti

Di seguito, i livelli di vibrazione rilevati dalla misurazione vibrometrica sono confrontati con i limiti previsti dalla norma UNI 9614:2017 in base alla destinazione d'uso del ricettore.

Tabella 4-3 - Confronto con il limite diurno

Posizione	Periodo	Destinazione d'uso	Limite Diurno (6am-10pm)	Vsorg Livello misurato	Valutazione
VIB_01	Diurno	Residenziale (*)	**7,2 mm/s²** (*)	**0,3 mm/s²**	**Entro il limite**

Tabella 4-4 - Confronto con il limite notturno

Posizione	Periodo	Destinazione d'uso	Limite Notturno (22pm-6am)	Vsorg Livello misurato	Valutazione
VIB_01	Notturno	Residenziale (*)	**3,6 mm/s²** (*)	**0,3 mm/s²**	**Entro il limite**

(*) La misura è stata effettuata in un edificio a destinazione d'uso mista, presso la porzione commerciale/servizi, ed è assunta a riferimento per la caratterizzazione della componente residenziale. I valori, pertanto, sono confrontati con i limiti previsti per gli edifici residenziali dalla UNI 9614:2017.

4.3 Valutazione dello stato attuale delle vibrazioni

Per la valutazione dello stato attuale delle vibrazioni è stato analizzato il livello di vibrazioni residuo rilevato presso il ricettore R10, rappresentativo del contesto insediativo presente nell'area di studio.

Dall'analisi dei valori rilevati in campo emerge che i livelli di vibrazione associati alla sorgente (Vsorg), registrati nel periodo diurno e notturno, risultano analoghi, con valori pari a **0,3 mm/s²**. Il livello vibrazionale residuo (Vres) assunto ai fini dell'elaborazione risulta pari a **0,1 mm/s²**.

Tale andamento è riconducibile sia al contesto insediativo in cui è inserito il ricettore, caratterizzato dalla presenza di insediamenti produttivi e relative attività e funzioni ordinarie, nonché di edifici a destinazione residenziale, sia al contesto territoriale circostante, caratterizzato dalla presenza di una rete infrastrutturale viaria e ferroviaria. Tali elementi contribuiscono alla definizione delle condizioni vibrazionali locali.

Nel complesso, i livelli misurati risultano coerenti con la posizione del ricettore rispetto al contesto insediativo e infrastrutturale circostante e compatibili con i riferimenti normativi adottati (UNI 9614:2017), evidenziando condizioni vibrazionali contenute.

Ai fini della presente valutazione, è stato assunto il valore del vettore di vibrazione residuo misurato in campo, pari a **0,1 mm/s²,** ritenuto cautelativamente rappresentativo delle condizioni di fondo dell'area di studio.

5 STUDIO DI IMPATTO VIBRAZIONALE – MODELLO PREVISIONALE

5.1 Definizione del disturbo vibrazionale

La caratterizzazione del disturbo vibrazionale è effettuata in termini di definizione del Vettore Sorgente (Vsorg espresso in mm/s^2) ossia del vettore accelerazione relativo alla sorgente in valutazione per determinare la percezione umana e della velocità (in mm/s) per valutare gli effetti delle vibrazioni sugli edifici. È possibile convertire i valori di accelerazione "a" nel corrispondente valore di velocità "v", nota la frequenza "f", tramite la relazione:

$$v = \frac{a}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

Convenzionalmente, in analogia con le analisi del rumore, sia i valori di velocità che quelli di accelerazione è possibile valutati sulla scala dei dB, tramite le relazioni:

$$L_{acc} = 20 \cdot \lg\left[\frac{a}{a_0}\right] \qquad L_{vel} = 20 \cdot \lg\left[\frac{v}{v_0}\right]$$

in cui compaiono i valori di riferimento a_0 = 0.001 mm/s^2 e v_0 = 1·10^{-6} mm/s.

5.2 Metodologia per la valutazione dei livelli vibrazionali indotti dal cantiere

Il fenomeno con cui un prefissato livello di vibrazioni imposto sul terreno si propaga nelle aree circostanti è correlato alla natura del terreno, alla frequenza del segnale e alla distanza fra il punto di eccitazione e quello di valutazione dell'effetto. Il metodo previsionale dei livelli di vibrazione ha impiegato simulazioni numeriche.

In dettaglio si illustrano i passi seguiti nell'elaborazione. La valutazione dei livelli vibrazionali è stata condotta a fronte dell'acquisizione degli spettri di emissione dei fenomeni considerati (attività dei mezzi di cantiere e per il trasporto dei materiali nonché impianti fissi), utilizzando sia dati bibliografici che rilievi strumentali. Gli spettri impiegati sono riferiti a misure eseguite ad una distanza nota dalla sorgente vibratoria e sono afferenti alla componente verticale. In particolare, si assume nello studio che la componete vettoriale che origina il Vettore Immissione e conseguentemente il Vettore Sorgente, sia la componente verticale.

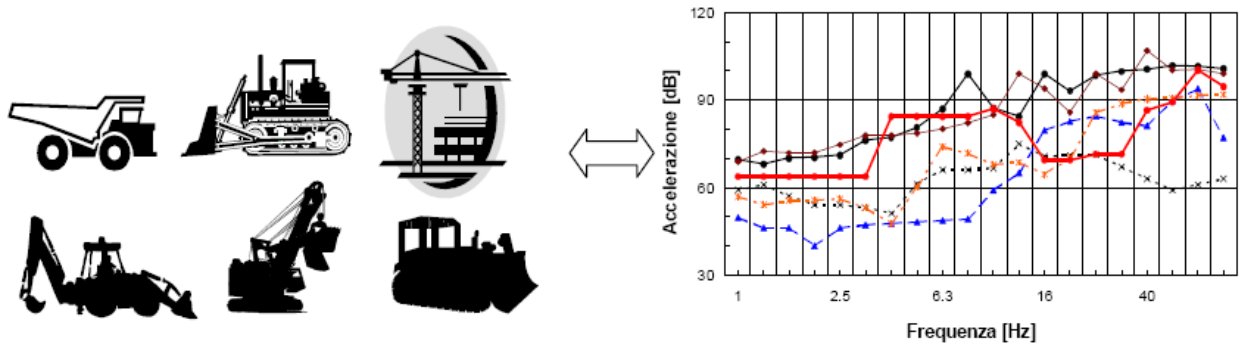


Figura 5-1 – Relazione tra mezzi d'opera e spettro di emissione di vibrazioni

Dagli spettri delle sorgenti si determina il livello di accelerazione non ponderato a distanze crescenti dalla sorgente mediante una legge di propagazione. Nel caso di sorgenti superficiali, ad esempio, si precisa che l'espressione con cui si esprime l'accelerazione ad una certa distanza d è basata sulla seguente formulazione:

$$a(d,f)=a(d_0,f)\cdot\left(\frac{d_0}{d}\right)^n\cdot e^{-2\pi\cdot f(\eta/c)\cdot(d-d_0)}$$

I livelli complessivi di accelerazione non pesati a distanze crescenti dalla sorgente corrispondenti agli scenari analizzati sono dati dalla combinazione, frequenza per frequenza, degli spettri di vibrazione relativi alle singole macchine previste. Come legge di combinazione degli spettri è stata adottata la regola SRSS (Square-Root-of-the-Sum-of-the-Squares) che consiste nell'eseguire la radice quadrata della somma dei quadrati delle ordinate spettrali relative alle singole macchine. Per ciascuna frequenza si è quindi ottenuto quindi un valore complessivo non pesato di tutte le macchine attive ($A_{TOT,f}$) sotto forma di matrice.

$$A_{TOT,f}=\sqrt{A_1(f,d)^2+A_2(f,d)^2+\ldots+A_N(f,d)^2} \quad \text{(SRSS)}$$

Relativamente ad ogni scenario modellizzato, si è applicato alla matrice citata la curva di attenuazione definita per postura non nota (o asse generico) dalla UNI 9614.

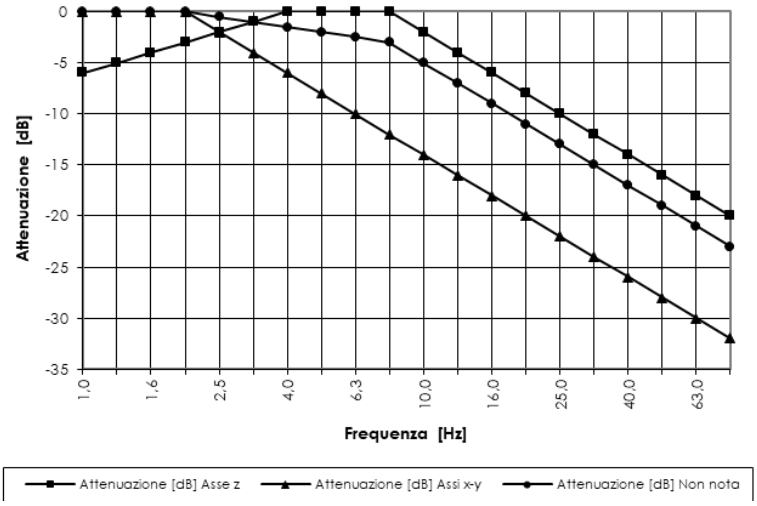


Figura 5-2 – Filtri di ponderazione per i diversi assi di riferimento

Si è quindi ottenuta la matrice dei livelli ponderati di accelerazione complessiva per singola frequenza e distanza, con cui è stato possibile realizzare specifici grafici di propagazione dello spetto della somma delle sorgenti analizzate.

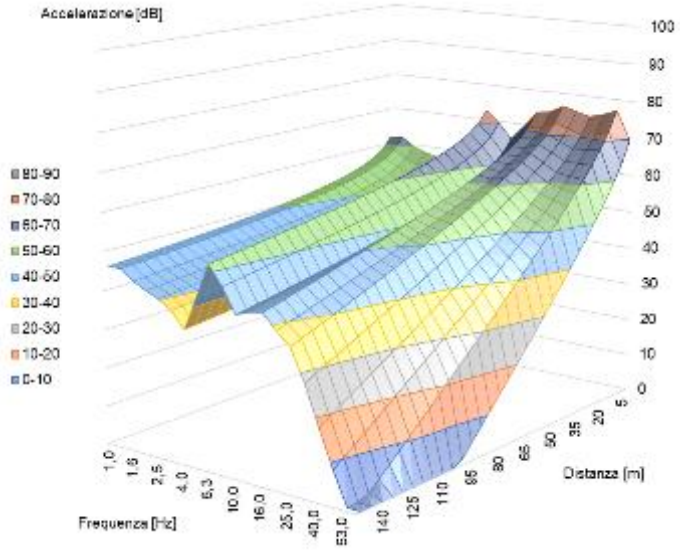


Figura 5-3 – Propagazione dello spettro di vibrazione

Il livello totale di accelerazione ponderata in funzione della distanza, $a_{w,d}$, è ottenuto sommando tutti i corrispondenti valori per frequenza $A_{TOT,f}$. Il numero ottenuto è rappresentativo dell'accelerazione complessiva ponderata sul vettore di riferimento, il quale individua il Vettore Immissione ad una determinata distanza. Ripetendo questa operazione per una griglia di distanze si è ottenuto il profilo di attenuazione dell'accelerazione ponderata e complessiva di tutti i Vettori di Immissione. Per la definizione del Vettore Sorgente sarà necessario stabilire il Vettore Residuo. In particolare, se il Vettore Residuo è molto basso il Vettore Immissione sarà molto prossimo, se non coincidente al Vettore Sorgente. Nella valutazione si procederà ad una valutazione del Vettore Residuo o tramite indagini sperimentali o in base a dati noti di letteratura basati sulla fruizione dei luoghi relativamente alla destinazione d'uso.

Al fine della definizione della funzione di trasferimento delle vibrazioni si procederà alla regressione dei valori ottenuti dall'espressione con cui si esprime l'accelerazione ad una certa distanza, valutandone la bontà tramite il coefficiente di determinazione R^2. Il coefficiente R^2 (R quadro), o coefficiente di determinazione, è un indice statistico che permette di valutare se un modello di regressione può essere affidabile ossia misura il legame tra la variabilità dei dati e la correttezza del modello statistico utilizzato. R^2 prossimo a 0 indica un modello le cui variabili predittive non spiegano la variabilità della y intorno alla sua media, mentre un R^2 prossimo a 1 indica un modello le cui variabili indipendenti riescono a predire completamente la variabilità della y intorno alla sua media.

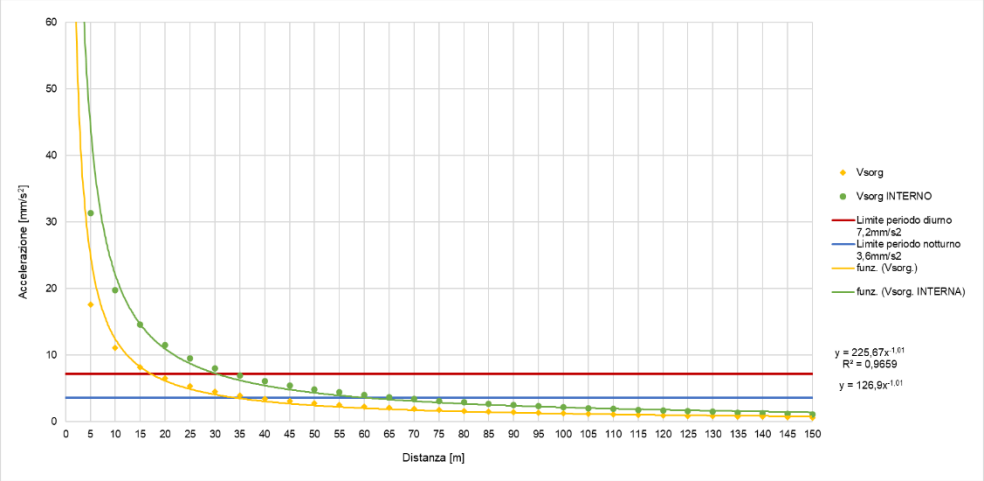


Figura 5-4 – Valutazione della propagazione del livello di vibrazioni (Vettore Sorgente) a diverse distanze

Ai fini del confronto con i livelli di riferimento della norma UNI 9614:2017 si procederà al confronto con il Vettore Sorgente determinato, in funzione dell'ubicazione del ricettore e della destinazione d'uso.

5.3 Modello di calcolo

Al fine dell'esecuzione del calcolo della propagazione delle vibrazioni saranno presi in considerazione due posizioni che possono assume le sorgenti: sarà identificato il caso in cui le sorgenti sono in superficie (sorgenti superficiali) ed in profondità (sorgenti profonde).

5.3.1 Sorgenti superficiali

Parlando della trasmissione di vibrazioni nel terreno, è necessario distinguere tra tre tipi principali di onde che trasportano energia vibrazionale: onde di compressione (onda P), onde di taglio (onda S) e onde di superficie (orizzontali, onde R, e verticali, onde L), le quali hanno velocità di propagazione differente in funzione del modulo di Poisson del terreno.

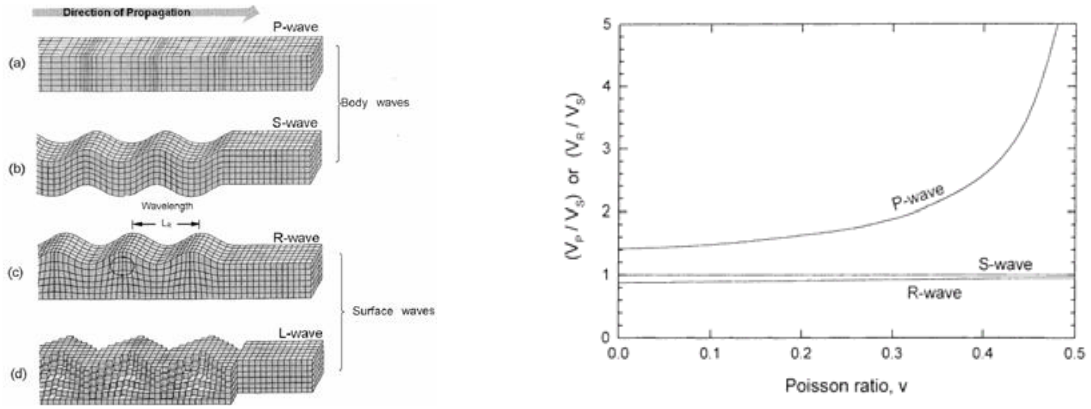


Figura 5-5 – Tipi di onda di volume e di superficie (a sinistra) e velocità relativa delle onde P, R rispetto onde S (a destra)

L'espressione con cui si esprime l'accelerazione ad una certa distanza d, per tutti tre i tipi di onde considerati (P, S, R), è basata sulla seguente formulazione:

$$a(d,f)=a(d_0,f)\cdot\left(\frac{d_0}{d}\right)^n\cdot e^{-2\pi\cdot f(\eta/c)\cdot(d-d_0)}$$

dove η è il fattore di perdita del terreno, c la velocità di propagazione in m/s, f la frequenza in Hz, d la distanza in m, e d_0 la distanza di riferimento a cui è noto lo spettro di emissione, assunta pari a 5m. L'esponente n varia a seconda del tipo di onda e di sorgente di vibrazioni. Ai fini dell'analisi dei livelli massimi, si è preceduto prendendo a riferimento una sorgente concentrata, fissando l'esponente n a 0.5 per le onde di superficie (predominanti in caso di sorgente posta in superficie) e 1 per le onde di volume (predominanti in caso di sorgente profonda). Risulta pertanto evidente come la propagazione a partire da una sorgente posta in profondità sia dotata, anche nel caso di terreno omogeneo, di molta più rapida attenuazione al crescere della distanza dalla sorgente.

Tabella 5-1 - Definizione dell'esponente n in base al tipo di sorgente e onda

Tipo di sorgente	Onda	Strato	n
Linea	Superfice	Superfice	0
	Volume	Superfice	1.0
Punto	Rayleight	Superfice	0.5
	Volume	Superfice	2.0
Linea Sotterranea	Volume	Profondo	0.5
Punto Sotterraneo	Volume	Profondo	1.0

Il termine esponenziale rappresenta i fenomeni di dissipazione di energia meccanica in calore, che, come si vede, va crescendo proporzionatamente alla frequenza. Ciò fa sì che le alte frequenze si estinguano dopo un breve percorso, mentre le frequenze più basse si propagano a distanze maggiori.

Il rapporto η/c (indicato anche come ρ) dipende, infine, dal particolare tipo di terreno considerato, ed assume valori elevati nel caso di terreno coltivato soffice, mentre assume valori molto modesti nel caso di pavimentazioni rigide.

Tabella 5-2 - Coefficiente di attenuazione

Classe	Descrizione del materiale	Coefficiente di attenuazione	ρ
I	Cedevole o tenero (terreno che può essere scavato facilmente)	0.003-0.01	$2x10^{-4}$ – $6x10^{-4}$
II	Consolidato (terreno che può essere scavato utilizzando una pala)	0.001-0.003	$6x10^{-5}$ – $2x10^{-4}$

Classe	Descrizione del materiale	Coefficiente di attenuazione	ρ
III	Duro (terreno che non può essere scavato con una pala ma necessità di un piccone)	0.0001-0.001	$6x10^{-6}$ - $6x10^{-5}$
IV	Duro consolidato (terreno che scavato difficilmente utilizzando un martello)	<0.0001	$<6x10^{-6}$

Il modello semplificato di propagazione illustrato considera i soli fenomeni previsti in un terreno supposto omogeneo ed isotropo, nel caso si abbia propagazione in presenza di edifici dalla struttura complessa, collegati al terreno mediante sistemi di fondazione, è evidente che i livelli di accelerazione riscontrabili all'interno risultino "filtrati" dalla funzione di trasferimento del sistema struttura edilizia.

In particolare, diversi sistemi di fondazione producono una attenuazione più o meno pronunciata dei livelli di accelerazione misurabili sulla fondazione stessa rispetto a quelli nel terreno circostante; tale aspetto è legato al fatto che l'interfaccia terreno-struttura non è perfettamente solidale, e pertanto genera fenomeni dissipativi o di amplificazione.

5.3.2 Sorgenti in profondità

Nel caso dell'attività di cantiere ove intervenga necessità di realizzazioni di opere in profondità (palificazione, ecc.), la valutazione della legge di propagazione delle vibrazioni con la distanza è più complessa, in quanto non si ha più la semplice legge di propagazione delle onde superficiali, ma si ha a che fare con una sorgente posta in profondità, che dà luogo alla propagazione di onde di volume. Si consideri ora lo schema di emissione illustrato nella seguente figura:

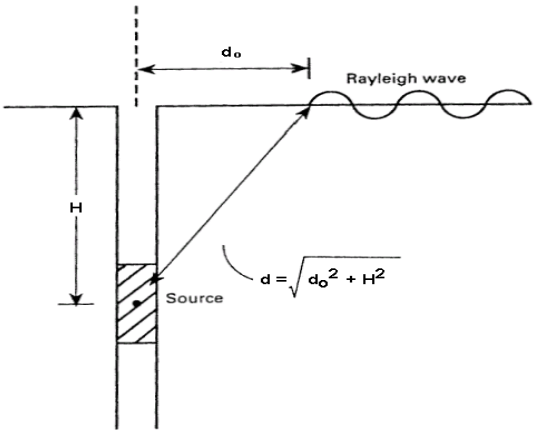


Figura 5-6 – Schema della propagazione a partire da una sorgente profonda

Si può notare che, rispetto all'emissione di onde di superficie da parte di una sorgente concentrata posta sulla sommità del suolo, al recettore arrivano onde che hanno compiuto un percorso più lungo, e che si sono maggiormente attenuate lungo tale percorso a causa della legge di divergenza volumetrica anziché superficiale.

Considerando che l'epicentro di emissione si collochi circa ad 1/2 della lunghezza dell'elemento infisso, ovvero, per un palo di 9 m, a circa 5 m di profondità, si ha la seguente espressione relativa alla propagazione delle vibrazioni con cui è possibile calcolare il livello di accelerazione sulla superficie del suolo in funzione della distanza d0 (misurata in orizzontale, sulla superficie) fra l'asse del palo ed il recettore.

$$a(d_0, f) = a(d_0, f) \cdot \left[\frac{d_0}{\sqrt{D^2 + H^2}} \cdot e^{-2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{\eta}{c} \cdot \left(\sqrt{D^2 + H^2} - d_0 \right)} \right]$$

Il calcolo verrà eseguito assumendo che:

- il recettore si trovi ad una profondità di 3 m sotto il piano di campagna, poiché questa è la quota a cui si trovano in media le basi delle fondazioni degli edifici;
- rispetto a tale posizione, poiché l'epicentro di emissione è posto a 5 m di profondità, H assume un valore pari a 2 m;
- la distanza D a cui si è rilevato strumentalmente lo spettro di vibrazioni dovuto alla lavorazione in profondità è 5 m.

5.3.3 Sintesi delle ipotesi assunte

Il calcolo dei livelli vibrazionali ai ricettori, in condizioni di campo libero, risultanti dalle configurazioni dei macchinari da cantiere previsti negli scenari analizzati è stato condotto considerando una legge di attenuazione stabilita sulla base delle seguenti assunzioni:

- le macchine da cantiere sono assunte come sorgenti puntuali;
- l'attenuazione dissipativa del mezzo è stata calcolata secondo un approccio teorico semplificato basato sull'ipotesi di mezzo debolmente dissipativo e campo vibratorio costituito in prevalenza da onde di superficie del tipo di Rayleight;
- nella valutazione sarà considerato il territorio con una tipologia di terreno mediamente consistente di tipo consolidato (Classe II, con ρ<1,5x10^{-4}; categoria C con c=380m/s; η=0,04);
- l'attenuazione geometrica afferente alla sorgente puntuale che lavora in superficie (escavatore, autocarro, pala, autocarro, ecc.) è stata assunta proporzionale a r^{-1}, mentre quella che opera in profondità è stata considerata con una legge di attenuazione proporzionale a $r^{-0.5}$;
- l'epicentro di emissione, nel caso di sorgenti profonde, si collochi circa ad 1/2 della lunghezza dell'elemento infisso nel terreno;
- i livelli vibrazionali a distanze crescenti dalla sorgente corrispondenti agli scenari analizzati sono dati dalla combinazione, frequenza per frequenza, degli spettri di vibrazione relativi alle singole macchine di cantiere, mediante radice quadrata della somma dei quadrati delle ordinate spettrali relative alle singole macchine.

6 VALUTAZIONE PREVISIONALE DI IMPATTO VIBRAZIONALE – FASE DI CANTIERE

6.1 Introduzione

La valutazione delle vibrazioni ha lo scopo di stimare gli effetti sull'ambiente circostante delle vibrazioni emesse dai macchinari di cantiere impiegati per la realizzazione dell'opera in progetto.

In dettaglio si procederà analizzando le principali sorgenti previste in funzione delle attività lavorative che saranno sostanzialmente raggruppabili in macchine operatrici (escavatore, sonda perforatrice, ecc.) ed in mezzi adibiti al trasporto (autocarri, autobetoniera, ecc.). Verrà descritto il metodo adottato per la previsione dei livelli vibrazionali indotti durante realizzazione delle opere e tali livelli saranno confrontati con i limiti della normativa in materia per ciò che riguarda l'effetto delle vibrazioni sulle persone e strutture.

Lo studio vibrazionale per la fase di cantiere è volto, in particolare, all'accertamento del disturbo alle persone, il quale ha limiti più restrittivi rispetto a quelli determinati sulle strutture. Pertanto, qualora si verifichi dall'esame della previsione di propagazione delle vibrazioni la presenza di edifici nelle più zone più critiche, tale elemento non costituisce un fattore per la stima di un possibile danno alle strutture, evidenziando unicamente il superamento di una soglia di disturbo per i residenti dell'edificio stesso. Tale soglia, pur ricavata dalle normative tecniche esistenti in sede nazionale ed internazionale, non risulta fissata da alcun atto legislativo.

Per quanto riguarda gli effetti sulle strutture, in presenza di livelli elevati e prolungati di vibrazioni, sono stati osservati danni strutturali a edifici e/o strutture. È da notare, però, che tali livelli sono più alti di quelli normalmente tollerati dagli esseri umani, i cui livelli sono riportati nelle norme ISO 2631 e UNI 9614. Tale considerazione è facilmente deducibile dal confronto dei valori riportati nelle norme che riportano i danni sull'uomo (ISO 2631 e UNI 9614) con i valori nelle norme che riguardano i danni strutturali (UNI 9916 ed ISO 4866), pertanto le prime sono state scelte quale riferimento, poiché riportano dei valori limite più restrittivi.

In definitiva, soddisfatto l'obiettivo di garantire livelli di vibrazione accettabili per le persone, risulta automaticamente realizzata l'esigenza di evitare danni strutturali agli edifici, almeno per quanto concerne le abitazioni civili. Come unica eccezione sono da annoverare le vibrazioni che incidono su monumenti e beni artistici di notevole importanza storico-monumentale, i quali devono essere trattati come punti singolari con studi e valutazioni mirate.

Per lo studio dell'impatto vibrazionale si è proceduto con le operazioni seguenti:

- analisi del territorio in cui si colloca l'opera e delle caratteristiche dei ricettori;
- definizione degli scenari critici in termini di impatto vibrazionale;
- valutazione delle vibrazioni previste sui ricettori prossimi.

6.2 Inquadramento degli interventi in progetto

Gli interventi previsti nell'ambito del progetto relativo al Data Center LIN10 di Treviglio comprendono la conservazione e la riqualificazione dell'edificio esistente, demolizione delle partizioni interne, realizzazione di due nuovi blocchi uffici con strutture leggere.

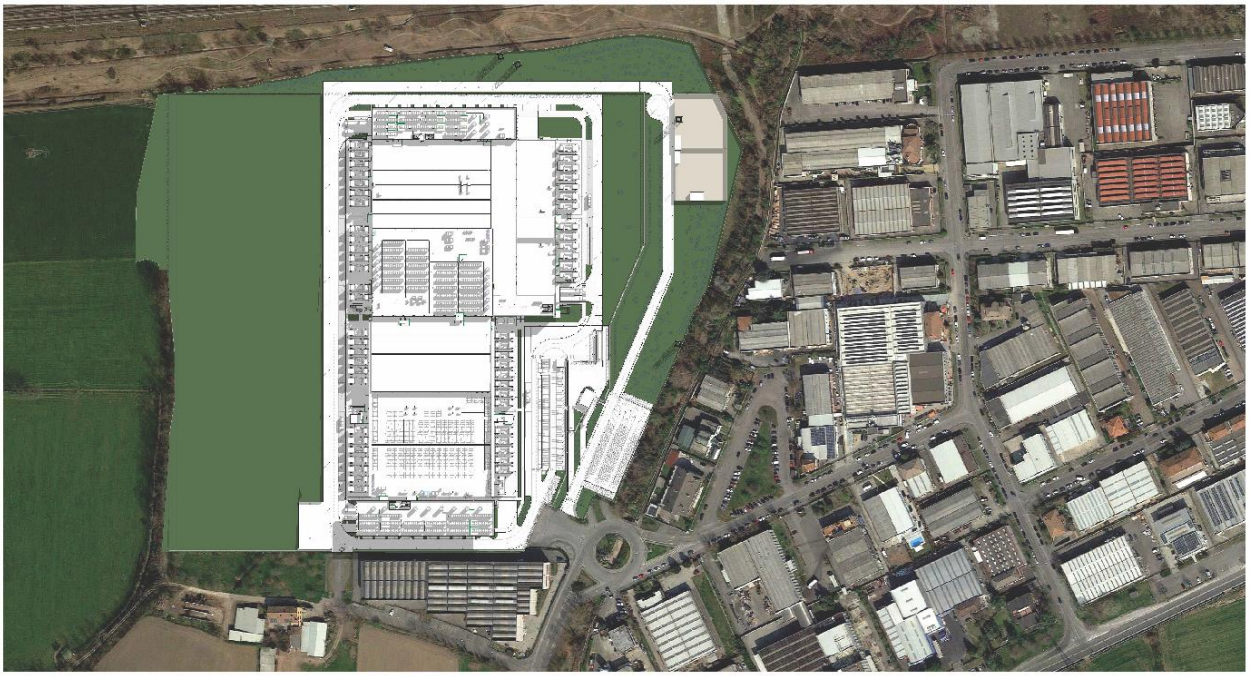


Figura 6-1 – Inquadramento planivolumetrico del Data Center LIN10 (Treviglio) sovrapposto a ortofoto

Ai fini della presente valutazione previsionale dell'impatto vibrazionale in fase di cantiere, gli scenari analizzati sono stati definiti con riferimento alle opere previste nell'ambito del progetto. Considerato l'attuale livello preliminare di definizione progettuale, in coerenza con quanto previsto nello Studio di Impatto Acustico (elaborato 4210_ES V VIA – Valutazione di impatto acustico), è stato assunto il medesimo scenario relativo alle attività di demolizione, utilizzato come riferimento anche per la valutazione delle emissioni vibrazionali connesse alle lavorazioni di cantiere. Nei paragrafi seguenti sono descritte le caratteristiche dello scenario e le relative ipotesi assunte ai fini della valutazione previsionale.

6.3 Valutazione degli aspetti ambientali legati al cantiere

Con riferimento alle vigenti normative, le attività di cantiere possono essere definite come sorgenti di vibrazione intermittente. Un ricettore adiacente all'area di cantiere è infatti soggetto ad una serie di eventi di breve durata, separati da intervalli in cui la vibrazione ha una ampiezza significativamente più bassa. In relazione alle attività lavorative di cantiere previste per la realizzazione dell'opera in esame, sono stati individuati scenari di cantiere critici per il potenziale impatto in termini di vibrazioni sull'ambiente circostante.

In particolare, le emissioni vibrazionali durante le lavorazioni possono essere legate agli impianti fissi/semifissi nei diversi cantieri stabili, e discontinue, dovute alle lavorazioni nelle aree di cantiere e nei fronti di avanzamento.

Si rammenta come l'impatto vibrazionale nelle simulazioni numeriche sarà valutato secondo al UNI 9614:2017 con il confronto con i valori di riferimento per il disturbo alle persone.

6.3.1 Definizione degli scenari di lavoro

Analizzando le principali sorgenti previste in funzione delle attività lavorative, si conviene come esse siano sostanzialmente raggruppabili in macchine operatrici ed in mezzi adibiti al trasporto, le prime hanno una distribuzione spaziale abbastanza prevedibile e delimitata all'interno dell'area di lavoro e movimentazione terre mentre, i secondi si distribuiscono lungo il percorso che collega il fronte di avanzamento lavori ai luoghi di approvvigionamento o di stoccaggio.

Gli scenari in esame sono stati definiti avendo come prima finalità quella di fornire risultati sufficientemente cautelativi sotto l'aspetto vibrazionale. Si sottolinea tuttavia come le situazioni esaminate non possano comunque rappresentare tutti i macchinari potenzialmente presenti in contemporanea all'interno dell'area di cantiere. La valutazione dei livelli vibrazionali è stata quindi condotta a fronte dell'acquisizione degli spettri di emissione dei macchinari di cantiere sopra citati utilizzando dati bibliografici o rilevati. Gli spettri impiegati sono riferiti a misure eseguite ad una distanza di circa 5m dalla sorgente vibratoria e sono afferenti alla componente verticale, la quale sarà assunta come componete principale del vettore di propagazione delle vibrazioni (vettore immissione).

In generale, nelle aree di cantiere ove sono presenti gli impianti fissi (p.es lavorazioni di dettaglio su eventuali opere civili, ecc.) le emissioni di vibrazioni risultano usualmente più contenute rispetto a quelle presenti sul cantiere in linea poiché la natura stessa delle lavorazioni determina minori sollecitazioni meccaniche sul terreno e, di conseguenza, minore trasmissione di energia meccanica verso i potenziali ricettori.

Il calcolo del livello di vibrazione in condizioni di campo libero sarà definito nell'intorno del cantiere con una risoluzione di circa 5 m nelle direzioni orizzontali (piano di campagna), ottenendo il grafico della propagazione delle vibrazioni in funzione della distanza.

La metodologia assunta per l'analisi delle interferenze riferita alla fase di cantierizzazione si basa sulla teoria del "*Worst Case"* Scenario. Tale metodo individua la condizione operativa di cantiere più gravosa in termini di emissioni di vibrazioni sul territorio in modo che verificandone le condizioni di esposizione del territorio alle vibrazioni indotte rispetto ai limiti della UNI 9614:2017 possano essere individuate le eventuali soluzioni di mitigazione più opportune al fine di contenere il disturbo sui ricettori più esposti. L'analisi tiene conto dell'insieme delle diverse attività di cantiere in funzione della localizzazione delle diverse aree di lavoro.

Come già evidenziato, ai fini della valutazione previsionale degli effetti vibrazionali presso i ricettori ubicati in prossimità del sito di intervento, è stato considerato un unico scenario, corrispondente allo **Scenario 01 – Fase di demolizione**, assunto quale configurazione di riferimento per la valutazione.

Per lo scenario considerato sono stati individuati i mezzi riportati nella tabella seguente, coerenti con quelli assunti per la medesima fase nell'ambito della valutazione acustica. Ai fini di una valutazione conservativa, si ipotizza che tali mezzi lavoreranno simultaneamente, assumendo pertanto la massima sovrapposizione delle lavorazioni previste. Per quanto riguarda l'orario di lavoro, si assume un'operatività nel solo periodo diurno.

Scenario 1 – Fase di Demolizione	
Mezzi	**Unità**
Escavatore	1(*)
Autocarro	1
Grù	1

(*) I macchinari contrassegnati con asterisco identificano il numero di mezzi assunto ai fini della modellazione vibrazionale del presente studio, definito tenendo conto del reale ingombro delle macchine e delle effettive modalità operative di cantiere. In applicazione della metodica adottata, che prevede cautelativamente la concentrazione dei mezzi in un'unica area puntuale lungo il perimetro dell'area di cantiere, il numero di macchinari considerato negli scenari vibrazionali risulta pertanto ridotto rispetto a quello previsto negli scenari dello studio acustico; in particolare, è stato considerato un solo escavatore, anziché i due previsti nello scenario acustico.

La valutazione dei livelli vibrazionali è stata condotta a fronte dell'acquisizione degli spettri di emissione dei macchinari di cantiere utilizzando dati bibliografici e misure dirette in campo. Gli spettri impiegati sono riferiti a misure eseguite ad una distanza di circa 5m dalla sorgente vibratoria e sono afferenti alla sola componente verticale considerata quella che fornisce il contributo maggiore sul vettore immissione.

Si precisa infine che stante l'indisponibilità di dati sperimentali per tutti i macchinari presenti nel cantiere in esame, si è proceduto utilizzando quelli di macchine in grado di trasmettere al terreno sollecitazioni di simile entità, ma di cui sia noto lo spettro.

Di seguito la tabella degli spettri di caratterizzazione delle sorgenti di vibrazioni[1] individuata per lo scenario di riferimento delle lavorazioni che li costituiscono. I valori seguenti sono espressi in mm/s^2.

Sc.1) FASE DI DEMOLIZIONE		**Frequenza (Hz)**																			
Mezzi attivi	D. (m)	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
Escavatore (tipo Fiat-Hitachi FH300 o similari)	5	0,32	0,20	0,19	0,12	0,20	0,26	0,24	0,25	0,28	0,30	0,98	1,88	9,89	13,34	16,79	12,59	12,02	28,84	51,88	8,41
Autocarro, Grù assimilati ad Autocarro (tipo Mercedes Benz 2629 o similari)	5	0,89	1,12	0,71	0,50	0,47	0,45	0,33	1,26	2,11	2,00	2,04	5,75	3,76	3,55	3,55	2,24	1,50	0,89	1,06	1,33

A seguire è riportato il grafico degli spettri delle sorgenti associate ai macchinari, confrontate con la curva di percezione prevista della UNI 9614 per la componente lungo l'asse Z. L'analisi del grafico consente di individuare le sorgenti caratterizzate dalle componenti spettrali potenzialmente più significative ai fini della percezione del disturbo vibrazionale.

[1] Fonte: L.H. Watkins - "Environmental impact of roads and traffic" - Appl. Science Publ.

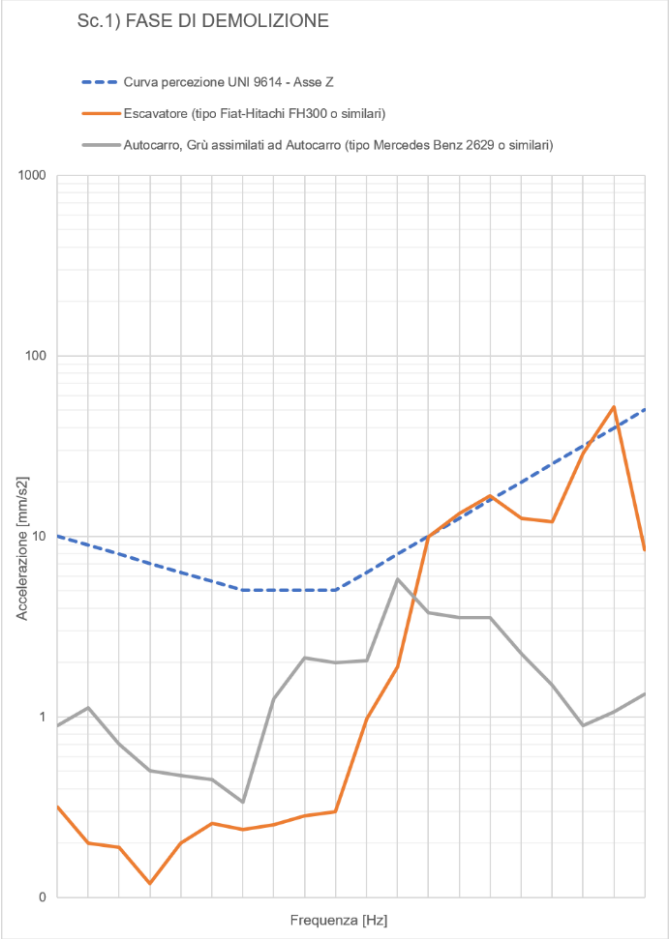


Figura 6-2 – Spettri delle sorgenti dei macchinari con confronto con curva di percezione della UNI 9614 per l'asse Z

6.3.2 Valutazione della propagazione delle vibrazioni

Dall'analisi della propagazione dello spettro nel terreno è possibile determinare, per ciascuna distanza dalla sede dell'attività lavorativa, il livello complessivo di accelerazione ponderata, ottenuto dalla combinazione dei contributi delle singole componenti in frequenza. Sulla base di tali risultati è stata quindi determinata la legge di variazione del livello di accelerazione ponderata in funzione della distanza.

Nella figura seguente sono riportati, per lo scenario di riferimento, gli spettri propagati nel terreno relativi alle lavorazioni considerate.

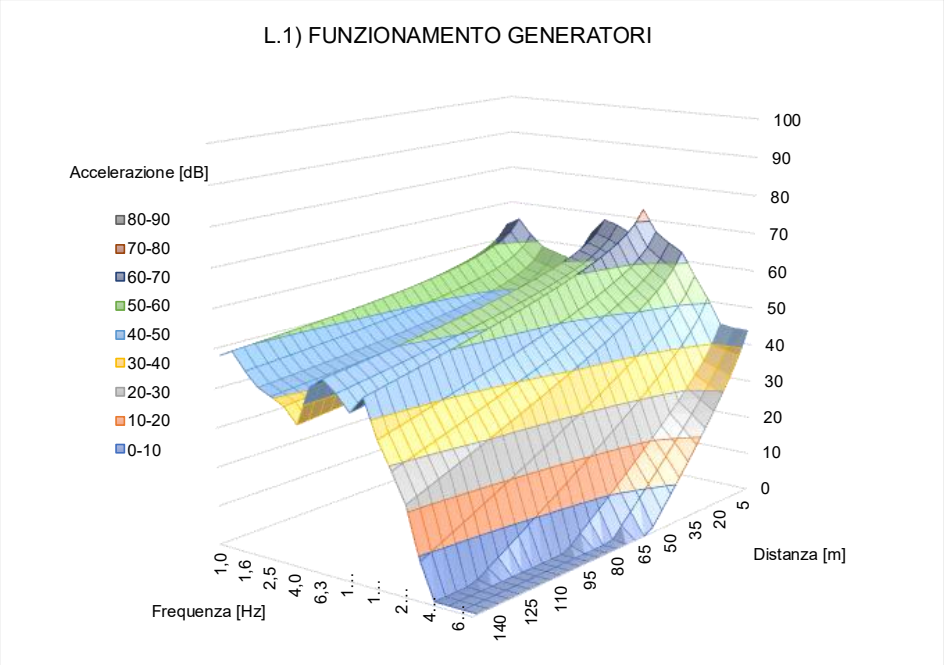


Figura 6-3 – Propagazione dei livelli di accelerazione in dB (UNI 9614) per singola frequenza

6.3.3 Stima dei futuri livelli vibrazionali

Il modello di propagazione illustrato fa riferimento ai soli fenomeni che avvengono nel terreno, supposto omogeneo ed isotropo (almeno all'interno di ogni strato), senza tenere in considerazione per il momento la presenza di edifici dalla struttura complessa, collegati al terreno mediante sistemi di fondazione che possono comportare variazioni dei livelli di accelerazione riscontrabili all'interno degli edifici stessi.

I sistemi fondazione in generale producono, in modo condizionato alla tipologia, un'attenuazione più o meno pronunciata dei livelli di accelerazione misurabili sulla fondazione stessa rispetto a quelli nel terreno circostante.

Inoltre, si rammenta il fenomeno della risonanza strutturale di elementi dei fabbricati, con particolare riferimento ai solai: quando infatti la frequenza dell'evento eccitante coincide con la frequenza naturale di oscillazione libera della struttura, quest'ultima registra un significativo incremento dei livelli di vibrazione rispetto a quelli registrabili sull'interfaccia terreno - costruzione.

Una stima dell'effetto locale di riduzione/amplificazione di ciascun edificio è possibile parametrizzando gli effetti combinati secondo curve empiriche che consentono la stima dei livelli di vibrazione in funzione dei livelli di vibrazione del terreno.

Sulla base di tali ipotesi, diviene possibile stimare in maniera approssimata per ogni edificio, note le sue caratteristiche costruttive, l'eventuale variazione massima sul solaio più sfavorito.

In merito alla previsione relativamente alla UNI 9614:2017 nelle seguenti considerazioni sull'entità dell'impatto vibrazionale presso i ricettori, avendo assunto un valore limite ammissibile pari a 7,2 mm/s^2 per gli edifici residenziali in virtù del periodo di lavoro diurno e un valore limite ammissibile pari a 14 mm/s^2 per gli edifici ad uso produttivo, si applicherà un fattore che tenga conto della possibile sovramplificazione da parte della struttura dell'edificio ricettore (assunta per tutti i ricettori pari a +5 dB) permettendo così la valutazione all'interno degli edifici.

In relazione al Vettore Residuo, esso è stato determinato sulla base della misura effettuata nell'ambito del presente progetto. Nel modello previsionale, ai fini della determinazione di Vsorg, è stato assunto un valore di residuo pari a 0,1 mm/s², corrispondente al valore rilevato presso il ricettore R10 e ritenuto cautelativamente rappresentativo delle condizioni vibrazionali locali.

Dall'analisi della propagazione spaziale del valore complessivo ponderato dell'accelerazione (Vettore di Immissione) per gli scenari individuati, tenendo conto del Vettore Residuo, è possibile determinare il Vettore Sorgente. Di seguito è riportata l'analisi della funzione di trasferimento relativa alla situazione lavorativa individuata per lo scenario di riferimento.

Sc.1 – Fase di demolizione. Per il presente scenario, il limite relativo al periodo diurno per i ricettori a destinazione residenziale, pari a 7,2 mm/s², considerando i possibili effetti di amplificazione indotti dagli edifici (assunti pari a +5 dB), risulta raggiunto a una distanza di circa 19 m dalla sorgente. Per i ricettori a destinazione commerciale/servizi/ufficio, per i quali il limite di riferimento è pari a 14 mm/s², la medesima analisi individua una distanza di circa 10 m.

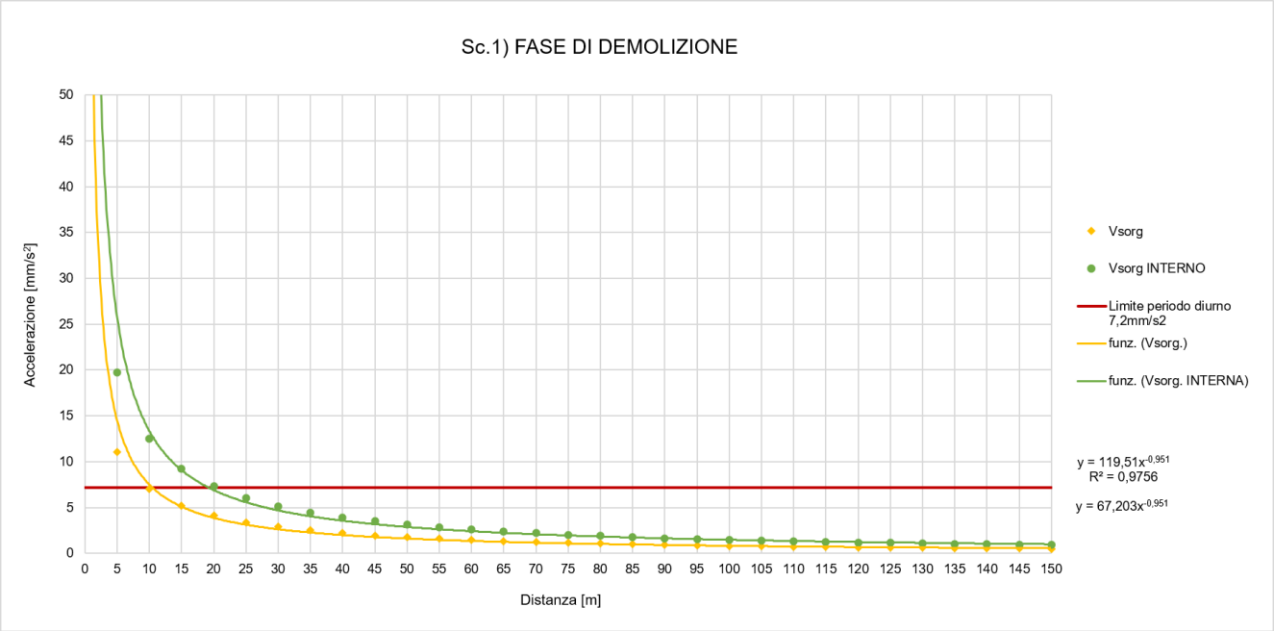


Figura 6-4 – Propagazione dei livelli di accelerazione stimati sui ricettori residenziali per lo Scenario 01

Di seguito la tabella con le distanze limite raggiunte per i limiti indicati dalla UNI 9614:2017 in funzione della destinazione d'uso dell'edificio.

Tabella 6-1 - Sintesi distanze dal confine dell'area di cantiere per cui si hanno valori di vibrazioni eccedenti i limiti

Scenario	Funzione di Trasferimento	R^2	Distanza in m del limite di 14 mm/s² interno a uffici	Distanza in m del limite Diurno di 7,2 mm/s² interno agli edifici residenziali	Distanza in m del limite di 5,4 mm/s² interno alle scuole	Distanza in m del limite Notturno di 3,6 mm/s² interno agli edifici residenziali	Distanza in m del limite di 2 mm/s² interno ad ospedali
Sc.1 – Fase di demolizione	$y=119,15 \cdot x^{-0,951}$	*0,98*	10	19	26	40(*)	74

(*) lavorazioni non previste attive nel periodo

Per determinare la bontà della funzione di trasferimento ottenuta, si procede ad eseguire la valutazione del parametro statistico R^2. La valutazione della funzione di regressione ha determinato un valore di R^2 pari a 0,98. Tale valore è da ritenersi pienamente accettabile e conferma la rappresentatività della funzione di trasferimento.

6.3.4 Valutazione delle vibrazioni ai ricettori

La presente sezione espone la valutazione della propagazione delle vibrazioni presso i ricettori per lo scenario individuato in precedenza, limitatamente al periodo diurno. Per lo scenario considerato è stata analizzata la fase operativa potenzialmente più impattante, relativa alle lavorazioni di demolizione del fabbricato esistente. A tal fine, è stata assunta come area di cantiere quella interessata dalle principali attività di demolizione, in quanto rappresentativa delle condizioni maggiormente gravose per la componente vibrazionale, con riferimento ai ricettori presenti nell'area di influenza delle lavorazioni previste.

Nello stralcio seguente è riportata l'area di influenza delle vibrazioni emesse dalle lavorazioni, definita mediante isolivelli rappresentativi dei valori limite della UNI 9614:2017 in funzione della destinazione d'uso dell'edificio. Tale rappresentazione consente di verificare la conformità dei ricettori ai valori limite, confrontando la tipologia d'uso dell'edificio con l'isolivello intercettato.

Ai fini della valutazione vibrazionale, sono stati considerati gli edifici del primo fronte prospiciente le aree di cantiere, con destinazione d'uso produttiva, nonché i ricettori residenziali più prossimi all'area di intervento. In conformità alla normativa vigente, per i ricettori a destinazione residenziale è stato assunto un limite di accelerazione di riferimento pari a 7,2 mm/s² nel periodo diurno, mentre per gli edifici a destinazione produttiva-commerciale il limite di riferimento adottato è pari a 14 mm/s².

6.3.4.1 Scenario 1 – Fase di demolizione

Figura 6-5 – Ampiezza propagazione delle vibrazioni – Sc.01

Al fine di fornire un quadro più dettagliato dell'impatto vibrazionale, nella tabella seguente sono riportati i range dei valori previsionali stimati presso i ricettori considerati nella presente valutazione. Tali valori consentono il confronto con i limiti di riferimento applicabili.

Scenario 01					
Nome	**Dest. D'uso**	**Distanza area cantiere m**	**Limite diurno mm/s²**	**Valore vibrazioni al ricettore mm/s²**	**Confronto con il limite del periodo diurno**
R1	Produttiva	57,9	14	2,5	entro il limite

Scenario 01					
Nome	**Dest. D'uso**	**Distanza area cantiere m**	**Limite diurno mm/s²**	**Valore vibrazioni al ricettore mm/s²**	**Confronto con il limite del periodo diurno**
R2	Residenziale	93,2	7,2	1,6	entro il limite
R3	Produttiva	166,4	14	0,9	entro il limite
R4a	Residenziale	237,8	7,2	0,7	entro il limite
R4d	Produttiva	146,3	14	1,0	entro il limite
R5	Produttiva	147,4	14	1,0	entro il limite
R6	Produttiva	115,4	14	1,3	entro il limite
R7	Residenziale	108,5	7,2	1,4	entro il limite
R8	Residenziale	86,8	7,2	1,7	entro il limite
R9	Residenziale	84,2	7,2	1,8	entro il limite
R10	Residenziale	98,6	7,2	1,5	entro il limite
R11	Produttiva	144,1	14	1,1	entro il limite
R12	Produttiva	149,2	14	1,0	entro il limite
R13a	Produttiva	167,0	14	0,9	entro il limite
R13c	Residenziale	176,4	7,2	0,9	entro il limite
R14	Residenziale	190,3	7,2	0,8	entro il limite
R15	Residenziale	208,2	7,2	0,7	entro il limite

Nell'ambito del presente scenario, dall'analisi dei livelli vibrazionali generati e dei valori previsionali riportati in tabella, si rileva che, durante le lavorazioni svolte nel periodo diurno, **non sono attesi superamenti dei limiti di riferimento presso i ricettori considerati**.

6.3.5 Misure di prevenzione e mitigazione

Poiché la valutazione previsionale non evidenzia superamenti dei limiti di riferimento, non si rendono necessarie specifiche misure di mitigazione. Tuttavia, nell'ottica di minimizzare ulteriormente gli impatti vibrazionali, si riportano di seguito alcune buone pratiche gestionali finalizzate a contenere le vibrazioni generate durante le attività di cantiere, quali, ad esempio, mantenere gli autocarri in stazionamento con motore acceso il più possibile lontano dai ricettori.

Qualora ritenuto opportuno in fase esecutiva, l'Appaltatore potrà adottare eventuali misure di dettaglio sulla base delle caratteristiche dei macchinari effettivamente impiegati e dell'organizzazione del cantiere, al fine di minimizzare ulteriormente gli impatti vibrazionali. A titolo indicativo, si raccomanda di:

- rispettare la norma di riferimento ISO 2631 con i livelli massimi ammissibili delle vibrazioni sulle persone;
- contenere i livelli vibrazionali generati dai macchinari agendo sulle modalità di utilizzo dei medesimi e sulla loro tipologia;
- definire le misure di dettaglio basandosi sulle caratteristiche dei macchinari da lui effettivamente impiegati;
- posizionare impianti fissi lontano dai ricettori sensibili;
- mantenere la buona cura delle aree di cantiere, come conservare in buono stato le strade di cantiere ed eliminare avvallamenti o buche;
- valutare, qualora ritenuto opportuno, la redazione di un "Piano di Gestione dell'Impatto Vibrazionale di Cantiere" (PGIVC), da integrare nel "Sistema di Gestione Ambientale di Cantiere".

Lo scopo ed i contenuti attesi nel "Piano di Gestione dell'Impatto Vibrazionale di Cantiere", come indicato nell'allegato C della norma UNI 9614:2017, sono di seguito esposti.

Il "Piano di Gestione dell'Impatto Vibrazionale di Cantiere" (PGIVC) è un elaborato, il quale permette di valutare preventivamente il potenziale impatto; di dare evidenza preventiva delle relative modalità di gestione analizzando le singole lavorazioni e i relativi processi gestionali. Il documento si configura come uno strumento per controllare l'effettiva adozione di strategie di gestione dell'impatto e per supportare il monitoraggio delle attività di cantiere e l'eventuale gestione di segnalazioni o criticità.

Il piano può anche essere contenuto all'interno del Piano di Gestione Ambientale di cantiere. I contenuti analizzati nel piano devono quindi concorrere all'obbiettivo di controllare e limitare i livelli di vibrazione.

Si riporta di seguito una lista dei contenuti attesi in un piano di gestione dell'impatto vibrazionale di cantiere (PGIVC). I contenuti evidenziati di seguito dovrebbero permettere di avere un documento che esplicita tutte le situazioni di impatto e le eventuali misure mitigative o di attenzione che verranno messe in atto.

Come già ricordato gli obbiettivi del PGIVC sono, per quanto ragionevolmente praticabile, controllare e limitare i livelli di vibrazione così che le residenze interessate o altri ricettori sensibili siano protetti da eccessivi livelli di vibrazione associati alle attività di cantiere.

Al fine di valutare gli effetti, il PGIVC potrà contenere le informazioni dettagliate sui ricettori prossimi al cantiere e potenzialmente interessati dal disturbo vibrazionale. Per ogni ricettore dovrebbe essere specificata la destinazione d'uso dell'edificio, le attività in esso svolte, le caratteristiche costruttive e le condizioni di conservazione, nonché informazione delle ore per le quali dovrebbe essere rispettata la quiete o il riposo. Queste informazioni saranno utili per definire una classifica di sensibilità dei ricettori da attenzionare durante il susseguirsi delle fasi di lavoro.

In merito alle lavorazioni il PGIVC dovrebbe contenere una loro lista, i relativi macchinari previsti ed il potenziale grada d'impatto sui ricettori più prossimi.

Le considerazioni sugli effetti sui ricettori dovrebbero essere supportate da una stima quantitativa dell'impatto per conoscere quale sarà il disturbo e per quanto durerà basando lo studio su valori numerici bibliografici o da misure di situazioni analoghe avvenute in cantiere.

Il PGIVC dovrebbe contenere un piano della comunicazione al fine di coinvolgere i ricettori sulle possibili criticità nelle fasi di lavoro da attuare prima dell'inizio delle attività di cantiere. Fornire una adeguata informazione alla popolazione interessata può permettere che le persone tollerino più facilmente le vibrazioni indotte. Le informazioni che dovrebbero essere trasmesse sono relative almeno ai livelli di disturbo attesi, alla durata delle lavorazioni e evidenziare che le vibrazioni non saranno tali da creare danni permanenti alle strutture.

Le comunicazioni dovrebbero essere fatte con sufficiente anticipo rispetto alle lavorazioni, in maniera chiara, completa ed efficace, così da esser certi che ogni potenziale ricettore impattato sia reso cosciente del disturbo.

All'inizio di ciascuna delle tipologie di lavorazioni e in particolare per quelle più disturbanti dovrebbero essere eseguite indagini vibrazionali. Le misure avranno lo scopo sia di validare le stime d'impatto sia di valutare il reale valore immesso dalle lavorazioni. Speciale attenzione deve essere dedicata ai ricettori sensibili e per quelli per i quali è previsto il riposo diurno. All'interno del piano dovrebbero essere quindi indicate le modalità di misura ed in riferimento alla UNI 9614:2017.

In relazione alle mitigazioni propriamente dette per un cantiere non esistono mitigazioni permanenti economicamente sensate o tecnicamente conseguibili senza arrecare possibili ulteriori fenomeni vibratori o aggiunta di lavorazioni. Tuttavia, il piano dovrebbe precisare:

- se e quando verranno previste interruzioni per il rispetto del riposo da mettere in relazione con la tipologia di ricettore;
- se sono state valutate alterative fra le modalità esecutive, al fine di ridurre il livello generato;
- se gli impianti fissi sono stati posizionali lontano da ricettori sensibili;
- qualunque altra buona cura, come per esempio evitare un utilizzo improprio dei macchinari e conservare in buono stato le strade di cantiere per eliminare avvallamenti o buche e limitare le cadute di oggetti dall'alto;

AI fine di garantire il corretto rispetto delle procedure indicate nel PGIVG dovrebbe essere previsto un piano dei controlli e degli audit interni allo scopo di garantire che l'attenzione al controllo del disturbo e dei retativi effetti sia costante per la durata del cantiere. I controlli devono riguardare il rispetto di:

- piani di monitoraggio;
- piano della comunicazione e verifica della sua efficacia;
- implementazione delle mitigazioni previste comprese anche le buone pratiche di cantiere.

7 VALUTAZIONE PREVISIONALE DI IMPATTO VIBRAZIONALE – FASE DI ESERCIZIO

7.1 Introduzione

Alla luce del citato quadro normativo di riferimento, si procederà di seguito alla valutazione dei possibili impatti derivanti dagli impianti esterni di prevista installazione, nella fase di esercizio e di test dell'impianto di emergenza.

In dettaglio, saranno valutate le seguenti condizioni di esercizio:

- funzionamento in condizioni ordinarie (diurno e notturno);
- funzionamento in condizioni di manutenzione.

Come evidenziato in precedenza, la condizione di funzionamento dei generatori a pieno regime in caso di blackout non verrà valutata. In riferimento alle Linee Guida MASE D.D. VA n. 257 del 02/08/2024, tale configurazione rappresenta infatti una condizione emergenziale, non riconducibile al normale ciclo operativo dell'impianto. Pertanto, non sarà oggetto di valutazione la seguente situazione di funzionamento:

- funzionamento dei generatori a pieno regime in condizioni blackout.

Lo studio è stato condotto mediante un approccio di tipo quantitativo (mediante la generazione di apposite mappe di propagazione delle vibrazioni e tabelle riepilogative dei risultati) per quanto riguarda la valutazione dei livelli di vibrazioni previsti ai ricettori presenti nelle aree limitrofe al sito oggetto di studio.

Le vibrazioni previste nell'area sono state valutate considerando, a fini cautelativi, i regimi di funzionamento degli impianti ai quali sono associate le massime emissioni di vibrazioni.

7.2 Descrizione delle sorgenti di vibrazioni connesse all'opera

Gli edifici del polo tecnologico di Treviglio sono progettati principalmente per ospitare Data Center, strutture dedicate alla gestione, elaborazione e stoccaggio dei dati digitali. Questi spazi, noti come Sale Dati, costituiscono il cuore del processo digitale e devono garantire continuità operativa e sicurezza dei dati.

L'attività del sito è a ciclo continuo e, ai fini della presente valutazione, si considera operativo sia in periodo diurno sia in periodo notturno.

Dal punto di vista delle vibrazioni indotte dal funzionamento degli impianti in progetto, il sistema può essere suddiviso nei seguenti tre macro ambiti:

- chiller installati in copertura ai corpi di fabbrica dei data center;
- parco generatori di energia elettrica di emergenza;
- viabilità pertinente ai data center.

7.2.1 Chiller in copertura ai corpi di fabbrica dei data center

Le emissioni vibrazionali del corpo di fabbrica del data center potrebbero essere determinate dal funzionamento dei gruppi frigoriferi (chiller), in quanto all'interno delle strutture non sono previsti dispositivi di massa in movimento.

Il posizionamento dei chiller è previsto in copertura come rappresentato nella seguente figura (in verde i chiller).

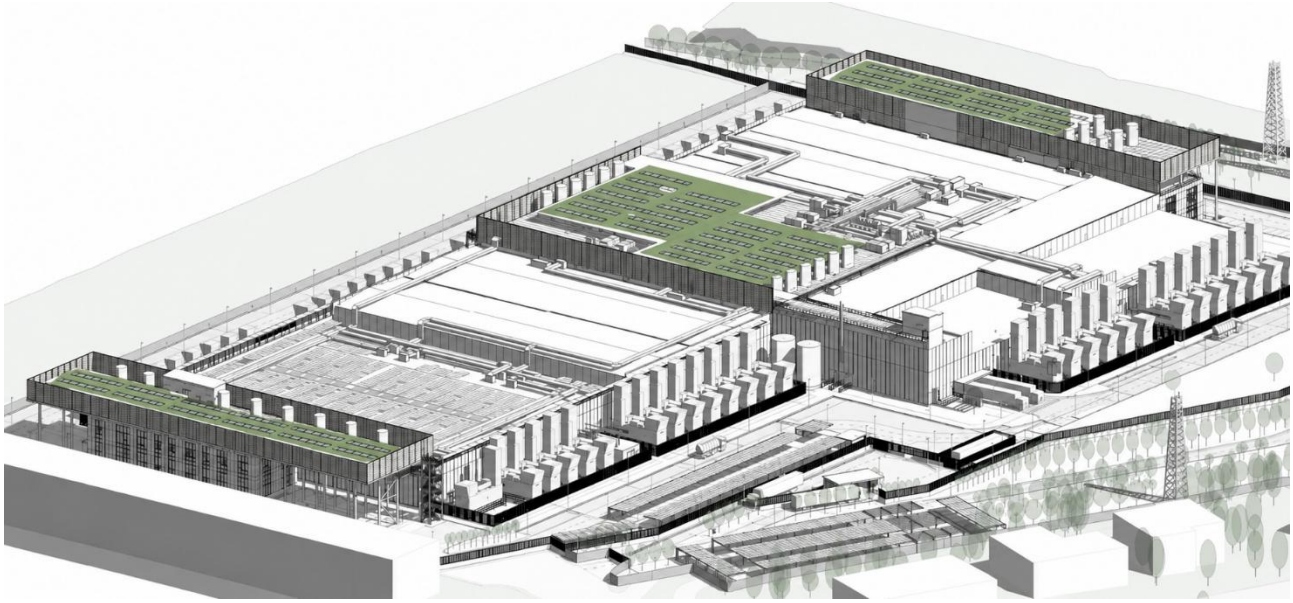


Figura 7-1 – Posizione chiller in copertura (in verde) dei data center

7.2.1.1 Valutazione della trasmissione di vibrazioni da chiller installati in copertura

L'installazione di gruppi frigoriferi (chiller) in copertura a edifici industriali comporta, in condizioni progettuali ordinarie, la generazione di livelli di vibrazione trascurabili, o nulli, alla base dell'edificio.

I chiller costituiscono macchine rotanti a velocità relativamente contenuta, generalmente equipaggiate con compressori scroll, vite o centrifughi e ventilatori assiali. Tali componenti generano vibrazioni meccaniche caratterizzate da frequenze prevalentemente comprese tra alcune decine e alcune centinaia di Hz, con ampiezze limitate.

In merito alla propagazione strutturale, la trasmissione delle vibrazioni verso i livelli inferiori dell'edificio risulta fortemente attenuata per i seguenti motivi principali:

- entità delle sorgenti vibrazionali;
- disaccoppiamento meccanico;
- smorzamento e dispersione strutturale;
- percorso di propagazione verticale.

Entità delle sorgenti vibrazionali: i livelli di vibrazione generati da chiller correttamente installati risultano generalmente dell'ordine di alcuni decimi di mm/s in velocità vibratoria sulla struttura di appoggio immediata, valori che tendono a diventare trascurabili al supporto antivibrante. In termini di accelerazione si può stimare generalmente, in prossimità dei supporti antivibranti, valori già trascurabili e ridotti all'ordine di alcune decine di mm/s^2.

Disaccoppiamento meccanico: i chiller sono normalmente installati su supporti antivibranti elastomerici o molle, progettati per introdurre una frequenza propria del sistema di supporto significativamente inferiore alle frequenze di eccitazione della macchina. Ciò determina un elevato fattore di isolamento dinamico (tipicamente >90%).

Smorzamento e dispersione strutturale: le vibrazioni che eventualmente entrano nella struttura dell'edificio subiscono una rapida attenuazione lungo gli elementi strutturali (solai, travi e pilastri) a causa dei fenomeni di smorzamento intrinseco dei materiali, proporzionalità fra le masse e delle discontinuità strutturali.

Percorso di propagazione verticale: il percorso tra la copertura e fondazione dell'edificio implica l'attraversamento di numerosi elementi strutturali. La trasmissione di vibrazione lungo tale percorso determina una riduzione progressiva dell'ampiezza vibratoria, con decadimento tipicamente superiore a diversi ordini di grandezza.

In riferimento alle considerazioni esposte, si può ritenere nella valutazione che i chiller installati in copertura, qualora correttamente posati su sistemi antivibranti e collegati mediante giunti flessibili alle reti impiantistiche, non costituiscano una sorgente di vibrazione alla base dell'edificio, né producano livelli vibrazionali tali da determinare effetti percettibili e/o di propagazione nel terreno.

7.2.2 Parco generatori di energia elettrica a terra

Il progetto del nuovo Data Center prevede un sistema elettrico di emergenza finalizzato a garantire la continuità dell'alimentazione dei carichi critici dell'edificio in caso di guasti o interruzioni della rete elettrica pubblica. A tal fine, sono previsti complessivamente **54 gruppi elettrogeni di emergenza alimentati a gasolio**, installati in aree esterne e alloggiati all'interno di appositi container, ciascuno dotato di serbatoio di carburante integrato del tipo "belly tank".

I gruppi elettrogeni sono destinati a entrare in funzione esclusivamente in condizioni di emergenza, in caso di interruzione dell'alimentazione elettrica da parte della rete pubblica, oppure nell'ambito dei periodici test di avviamento e funzionamento previsti per la verifica della loro efficienza e affidabilità. In condizioni di normale esercizio del Data Center, i generatori saranno pertanto mantenuti spenti.

I serbatoi integrati nei container sono dimensionati per garantire, in condizioni di emergenza, un'autonomia di funzionamento continuo del singolo gruppo elettrogeno fino a 24 ore.

Al fine di garantire nel tempo la piena funzionalità e l'affidabilità del sistema di emergenza, i gruppi elettrogeni saranno sottoposti a periodici test di avviamento e funzionamento. Le prove saranno effettuate

su un solo gruppo elettrogeno alla volta e saranno eseguite esclusivamente durante il periodo diurno, nelle ore centrali della giornata (fasce orarie 09:30–12:30 e 15:30–18:30), con le seguenti durate:

- 30 minuti una volta al mese, per 11 mesi all'anno;
- 1 prova annuale della durata massima di 1 ora.

L'esercizio del parco dei generatori è pertanto riconducibile alle attività di test periodico e all'eventuale attivazione in condizioni di emergenza in caso di blackout della rete elettrica. Quest'ultima condizione, per le motivazioni precedentemente indicate, non sarà oggetto della presente valutazione.

7.2.2.1 Valutazione dello spettro di emissione vibrazionale di generatori elettrici

I gruppi elettrogeni alimentati a gasolio installati all'interno di box insonorizzati, nelle aree previste nei pressi degli edifici costituenti il Data Center, sono sorgenti vibrazionali riconducibili, per principio di funzionamento e caratteristiche dinamiche, alle macchine con motore endotermico diesel accoppiato a masse rotanti.

Dal punto di vista meccanico il gruppo elettrogeno è costituito da:

- motore diesel pluricilindrico;
- alternatore elettrico accoppiato;
- sistemi ausiliari (ventilazione, raffreddamento);
- basamento con supporti antivibranti.

Le vibrazioni generate derivano principalmente dalle forze di combustione e dalle masse rotanti del motore, con componenti spettrali concentrate alle frequenze legate alla velocità di rotazione e ai suoi multipli, nonché dall'alternatore.

In modo analogo, anche un autocarro è dotato di motore diesel con caratteristiche costruttive e cinematismi assimilabili (architettura pluricilindrica e regime di rotazione analogo). Ne deriva che lo spettro di eccitazione primaria delle vibrazioni prodotte dal motore presenta frequenze dominanti comparabili, generalmente comprese nell'intervallo 20–100 Hz, con armoniche superiori legate agli ordini di combustione.

Dal punto di vista della trasmissione delle vibrazioni al suolo, i due sistemi presentano inoltre analogie funzionali nei meccanismi di isolamento dinamico:

- nell'autocarro il contatto con il suolo avviene tramite pneumatici, che introducono una significativa capacità di isolamento elastico e smorzamento;
- nel caso dei gruppi elettrogeni installati in box, il basamento è normalmente appoggiato su supporti antivibranti elastomerici o a molla, progettati proprio per ridurre la trasmissione delle vibrazioni alla struttura e/o al terreno.

Pertanto, sia nel caso dell'autocarro sia nel caso del gruppo elettrogeno, il sistema complessivo sorgente–isolamento può essere schematizzato come massa eccitata su supporto elastico, con un comportamento dinamico comparabile in termini di filtraggio delle componenti vibrazionali verso il suolo.

In aggiunta, la presenza del box insonorizzato contribuisce a incrementare ulteriormente lo smorzamento globale del sistema e a ridurre l'accoppiamento diretto con l'ambiente esterno.

In riferimento alle analogie valutate:

- nel principio di generazione delle vibrazioni (motore diesel pluricilindrico);
- nello spettro di eccitazione principale (frequenze associate al regime di rotazione e agli ordini di combustione);
- nei meccanismi di isolamento elastico verso il suolo (pneumatici nel caso dell'autocarro, supporti antivibranti nel caso del gruppo elettrogeno);

risulta ragionevole assumere che lo spettro di emissione vibrazionale di un generatore elettrico diesel installato in box insonorizzato sia assimilabile, in prima approssimazione, a quello prodotto dal passaggio o dal funzionamento di un autocarro.

Tuttavia, al fine di mantenere un approccio prudenziale nella valutazione delle vibrazioni, si assume che un singolo generatore elettrico alimentato a gasolio possa produrre uno spettro vibrazionale equivalente a quello generato da tre autocarri, così da introdurre un adeguato margine cautelativo nelle successive analisi di propagazione e negli eventuali confronti con i livelli di riferimento ambientali.

Nella tabella e nel grafico seguenti è riportata la caratterizzazione della sorgente vibrazionale relativa all'autocarro assimilato ai generatori, espressa in mm/s², utilizzata per le successive valutazioni di propagazione e per il confronto con i livelli di riferimento.

L.1) FUNZIONAMENTO GENERATORI		**Frequenza (Hz)**																			
Mezzi attivi	D. (m)	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
Generatore elettrico diesel assimilato ad Autocarro (tipo Mercedes Benz 2629 o similari)	5	0,32	0,20	0,19	0,12	0,20	0,26	0,24	0,25	0,28	0,30	0,98	1,88	9,89	13,34	16,79	12,59	12,02	28,84	51,88	8,41

Di seguito è riportato il grafico dello spettro della sorgente vibrazionale relativa all'esercizio dei generatori elettrici, assimilati ad autocarro, con confronto con la curva di percezione secondo UNI 9614:2017 per l'asse Z.

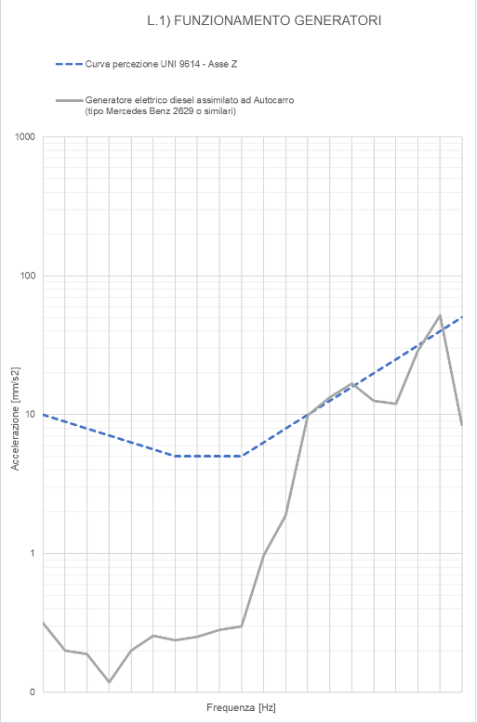


Figura 7-2 – Spettro delle sorgenti dei macchinari con confronto con curva di percezione della UNI 9614 per l'asse Z

7.2.2.2 Valutazione della propagazione delle vibrazioni in fase di esercizio dei generatori

Dall'analisi della propagazione dello spettro, per ogni distanza dalla base dei generatori è possibile calcolare il livello complessivo di accelerazione ponderata, come somma dei livelli delle singole frequenze. In questo modo è stata determinata la legge di variazione del livello di accelerazione ponderata in funzione della distanza. Nella figura seguente è riportata la propagazione dello spettro nel terreno per la situazione di esercizio dei generatori elettrici.

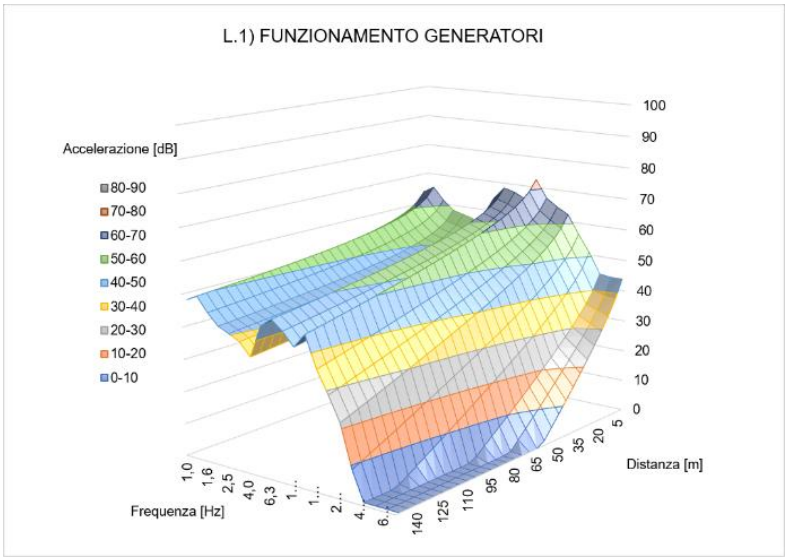


Figura 7-3 – Propagazione dei livelli di accelerazione in dB (UNI 9614) per singola frequenza

7.2.2.3 Previsione dell'impatto vibrazionale in fase di esercizio dei generatori

Come già discusso nel capitolo precedente, il modello di propagazione adottato descrive i fenomeni di trasmissione delle vibrazioni nel terreno, assunto omogeneo e isotropo all'interno dei singoli strati, senza una modellazione esplicita dell'interazione terreno–struttura. In presenza di edifici, i sistemi di fondazione possono determinare una variazione dei livelli di vibrazione rispetto a quelli presenti nel terreno circostante, generalmente con effetti di attenuazione; tuttavia, in alcuni casi possono verificarsi fenomeni di amplificazione legati alla risonanza strutturale degli elementi edilizi, in particolare dei solai. Tali effetti locali possono essere valutati in maniera approssimata mediante relazioni empiriche che correlano i livelli di vibrazione nel terreno con quelli all'interno degli edifici.

In relazione alla previsione secondo la UNI 9614:2017, nelle seguenti considerazioni sull'entità dell'impatto vibrazionale presso i ricettori si assumono valori limite pari a 7,2 mm/s² per gli edifici residenziali (periodo diurno) e 14 mm/s² per edifici ad uso produttivo/servizi/uffici/commerciale. Ai fini della valutazione dei livelli all'interno degli edifici, ai valori stimati viene applicato un fattore di possibile sovramplificazione strutturale pari a +5 dB, assunto cautelativamente per tutti i ricettori.

Anche in questo caso, il Vettore Residuo è stato determinato sulla base della misura effettuata nell'ambito del presente progetto. Nel modello previsionale, pertanto, è stato adottato un valore pari a **0,1 mm/s²**, corrispondente al valore rilevato in sede di misura e rappresentativo delle condizioni locali.

Dall'analisi della propagazione spaziale del valore complessivo ponderato dell'accelerazione (Vettore Immissione) per gli scenari individuati, e tenendo conto del Vettore Residuo, viene quindi determinato il Vettore Sorgente. Di seguito l'analisi della funzione di trasferimento individuata per la fase di esercizio dei generatori elettrici.

L.1 – Funzionamento generatori. Per il presente scenario di esercizio, il limite relativo al periodo diurno per i ricettori a destinazione residenziale, pari a 7,2 mm/s², considerando i possibili effetti di amplificazione indotti dagli edifici (assunti pari a +5 dB), risulta raggiunto a una distanza di circa 16 m dalla sorgente. Per i ricettori a destinazione commerciale/servizi/ufficio, per i quali il limite di riferimento è pari a 14 mm/s², la medesima analisi individua una distanza di circa 7 m.

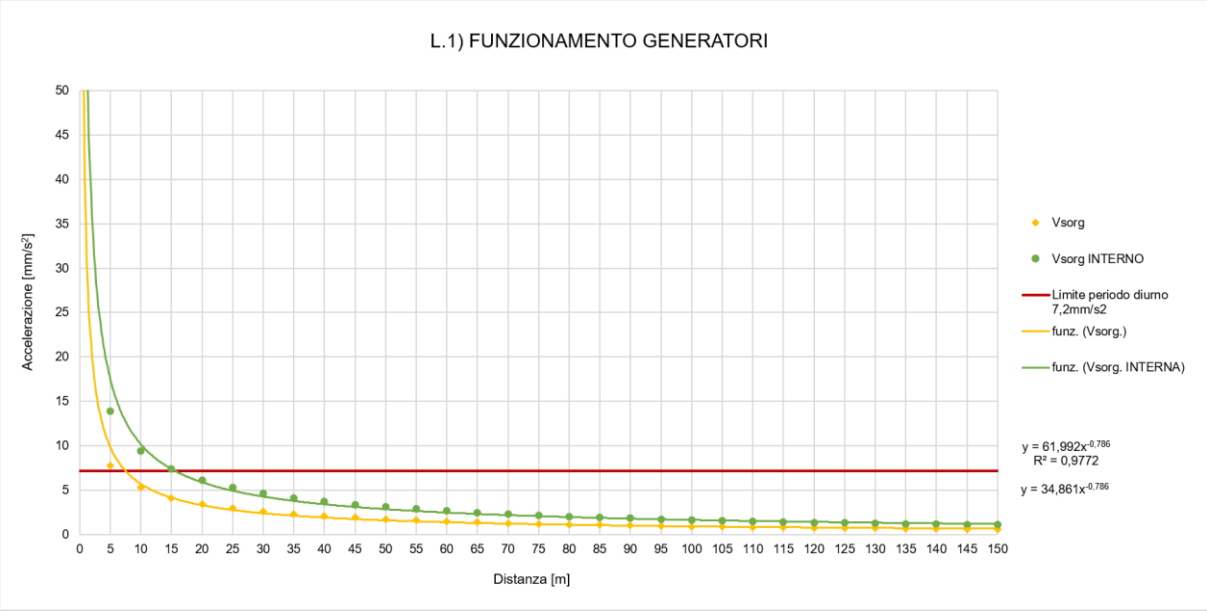


Figura 7-4 – Propagazione dei livelli di accelerazione stimati sui ricettori residenziali in fase di esercizio dei generatori

Di seguito la tabella con le distanze limite raggiunte per i limiti indicati dalla UNI 9614:2017, in funzione delle destinazioni d'uso dell'edificio.

Tabella 7-1 - Sintesi distanze dai singoli generatori per cui si hanno valori di vibrazioni eccedenti i limiti

Situazione	Funzione di Trasferimento	R^2	Distanza in m del limite di 14 mm/s² interno a uffici	Distanza in m del limite Diurno di 7,2 mm/s² interno agli edifici residenziali	Distanza in m del limite di 5,4 mm/s² interno alle scuole	Distanza in m del limite Notturno di 3,6 mm/s² interno agli edifici residenziali	Distanza in m del limite di 2 mm/s² interno ad ospedali
Funzionamento generatore	$y=61,992 \cdot x^{-0,786}$	0,98	7	16	22	37(*)	79

(*) funzionamento dei generatori non previsto attivo nel periodo

Ai fini della valutazione della bontà della funzione di trasferimento ottenuta è stato analizzato il parametro statistico R^2, che assume un valore pari a 0,98. Tale valore si ritiene accettabile e consente di considerare la funzione di trasferimento come rappresentativa del fenomeno analizzato.

7.2.2.4 Valutazione delle vibrazioni ai ricettori in fase di esercizio

Sulla base della configurazione di progetto dei futuri gruppi elettrogeni, ai fini della verifica dell'impatto vibrazionale sono stati considerati quattro scenari rappresentativi, corrispondenti alle postazioni ritenute maggiormente critiche sotto il profilo delle emissioni vibrazionali.

La selezione degli scenari è stata effettuata tenendo conto della distribuzione dei ricettori presenti nell'area, individuando, tra le posizioni previste dal progetto, quelle in cui i generatori risultano più prossimi ai ricettori residenziali. Tali condizioni sono state assunte come riferimento per la valutazione in condizioni cautelative.

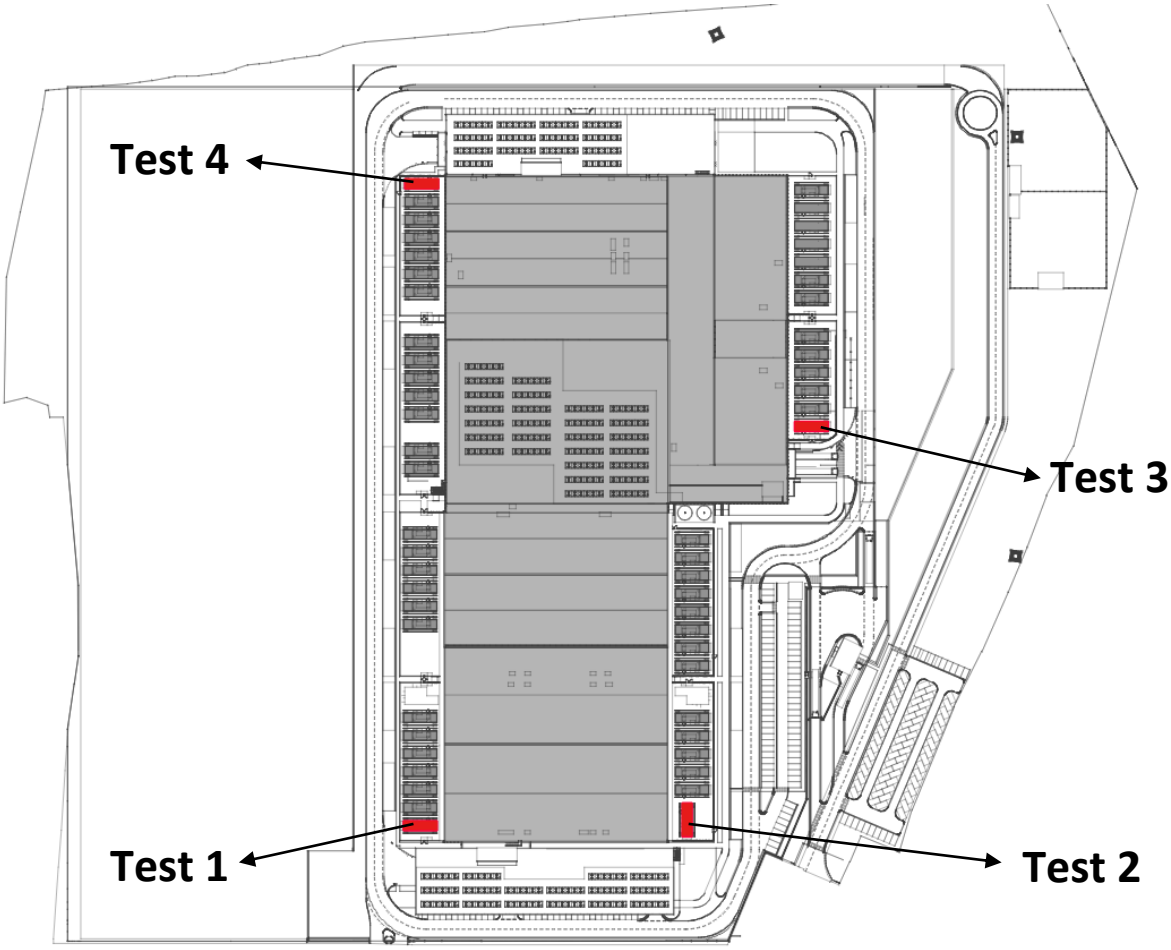


Figura 7-5 – Ubicazione dei generatori elettrici diesel considerati nei diversi scenari di test

Di seguito si riportano gli stralci cartografici relativi ai quattro scenari di test di esercizio dei generatori considerati, con la rappresentazione delle curve isolivello delle vibrazioni. Gli elaborati consentono di inquadrare la propagazione delle vibrazioni nel contesto territoriale.

Fase di esercizio dei generatori – Scenario di test 1

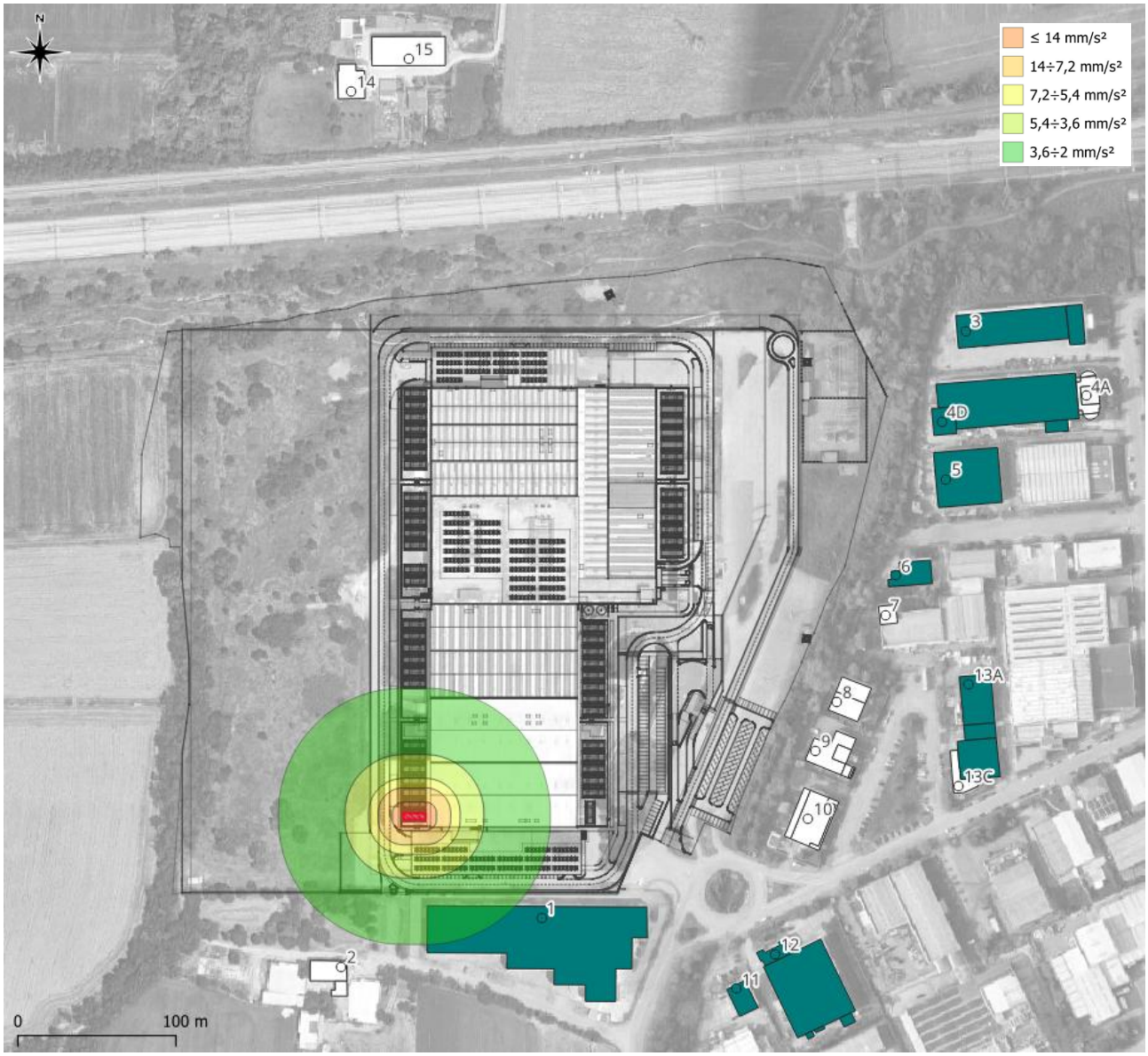


Figura 7-6 Ampiezza propagazione delle vibrazioni in fase di esercizio – Scenario di test 1

Fase di esercizio dei generatori – Scenario di test 2

Figura 7-7 Ampiezza propagazione delle vibrazioni in fase di esercizio – Scenario di test 2

Fase di esercizio dei generatori – Scenario di test 3

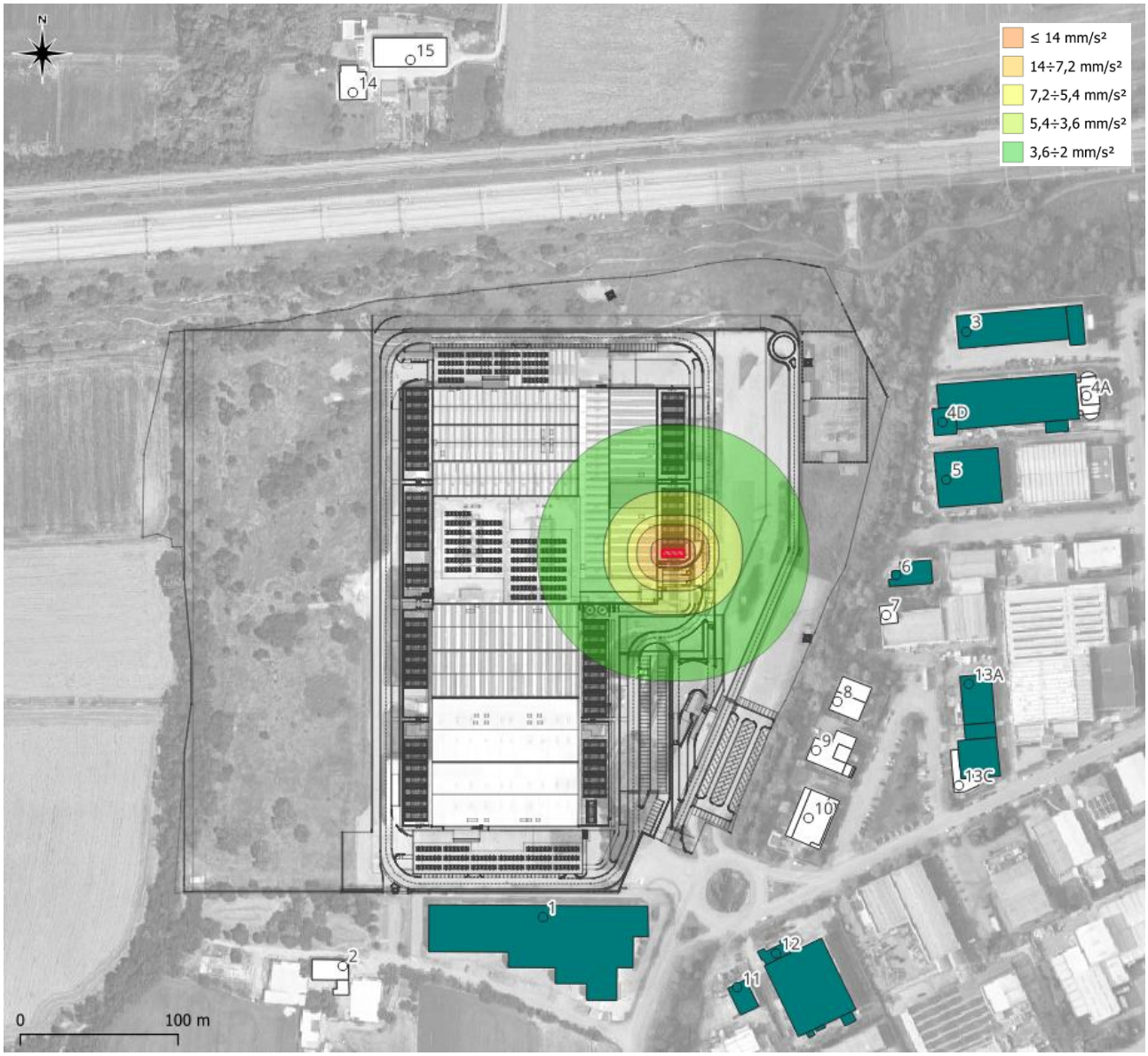


Figura 7-8 Ampiezza propagazione delle vibrazioni in fase di esercizio – Scenario di test 3

Fase di esercizio dei generatori – Scenario di test 4

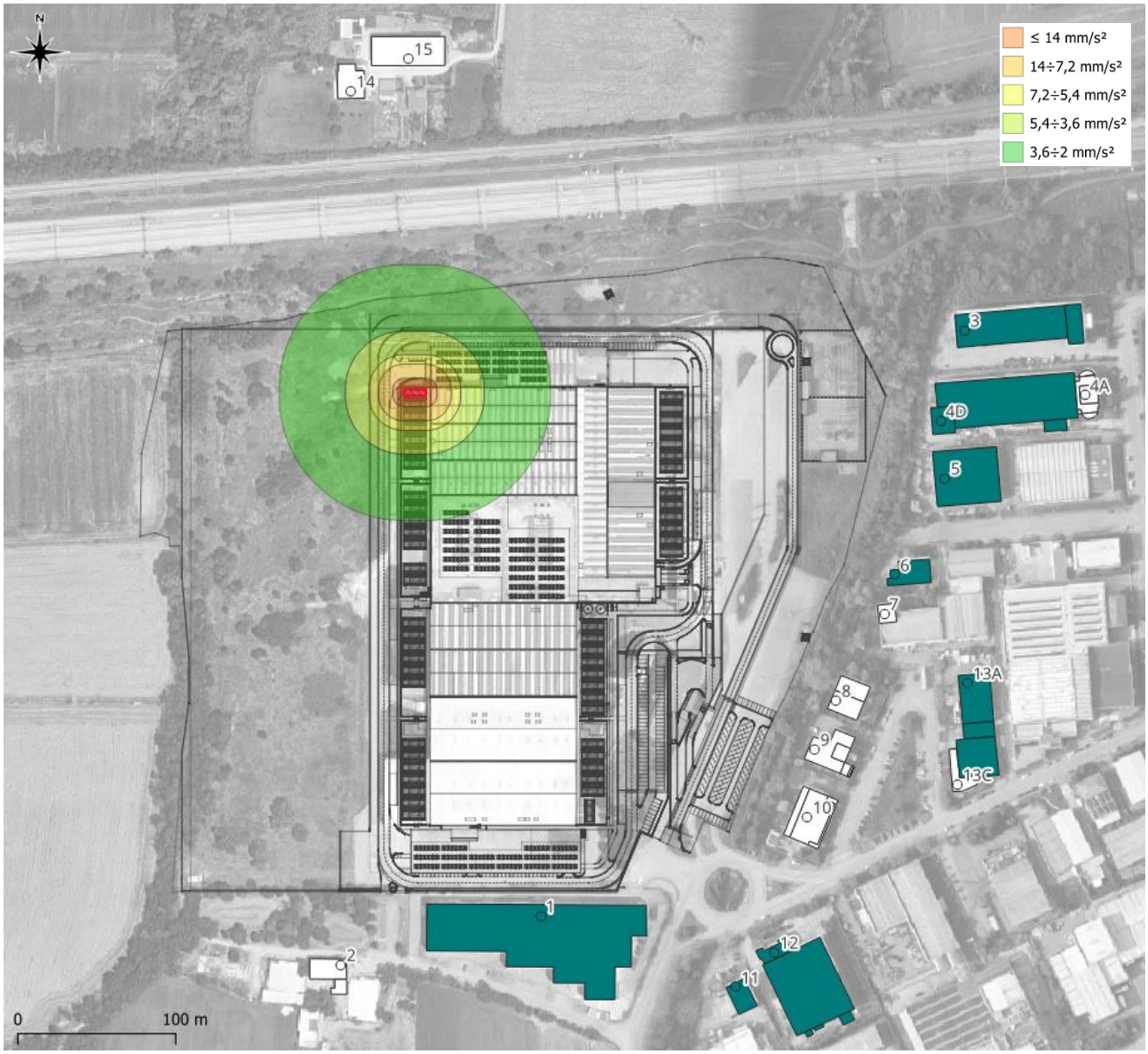


Figura 7-9 Ampiezza propagazione delle vibrazioni in fase di esercizio – Scenario di test 4

La tabella seguente riporta i valori di accelerazione stimati all'interno di ciascun ricettore in relazione ai diversi scenari di test analizzati, confrontati con i limiti previsti dalla normativa UNI 9614:2017 vigente.

Nome	Dest. D'uso	Distanza area cantiere m	Limite diurno mm/s²	Valore vibrazioni al ricettore mm/s²	Confronto con il limite del periodo diurno
Scenario di test 1					
R1	Produttivo	96,3	7,2	1,7	entro il limite
R2	Residenziale	101,1	7,2	1,6	entro il limite
Scenario di test 2					
R1	Produttiva	66,4	14	2,3	entro il limite
R9	Residenziale	144,2	7,2	1,2	entro il limite
R10	Residenziale	135,9	7,2	1,3	entro il limite
R11	Produttiva	138,5	14	1,3	entro il limite
R12	Produttiva	141,7	14	1,2	entro il limite
R13C	Residenziale	231,6	7,2	0,8	entro il limite
Scenario di test 3					
R3	Produttiva	226,5	14	0,9	entro il limite
R4A	Residenziale	272,9	7,2	0,7	entro il limite
R4D	Produttiva	182,7	14	1,0	entro il limite
R5	Produttiva	172,3	14	1,1	entro il limite
R6	Produttiva	135,3	14	1,3	entro il limite
R7	Residenziale	133,2	7,2	1,3	entro il limite
R8	Residenziale	134,0	7,2	1,3	entro il limite
R13A	Produttiva	198,0		0,9	entro il limite
Scenario di test 4					
R14	Residenziale	191,5	7,2	1,0	entro il limite
R15	Residenziale	209,7	7,2	0,9	entro il limite

In riferimento agli stralci cartografici riportati in precedenza e all'analisi dei ricettori presenti nell'ambito di studio dello stato di progetto, si evidenzia che nessun ricettore risulta compreso nell'area di propagazione delle vibrazioni con valori superiori ai limiti previsti per la rispettiva destinazione d'uso; pertanto, per tutti i ricettori si stima un livello di accelerazione conforme alle soglie di riferimento della norma UNI 9614:2017 per il periodo diurno, determinando un clima vibrazionale complessivamente conforme durante il funzionamento dei generatori elettrici.

7.2.3 Viabilità pertinente al data center

L'esercizio della viabilità determina limitate emissione di vibrazioni in fase di esercizio. Come noto le vibrazioni indotte dal passaggio di veicoli si esaurisce nella prossimità del limite della carreggiata e la loro variazione è funzione principalmente dello stato dello strato di usura della pavimentazione stradale. Pertanto, considerato le possibili limitate vibrazioni indotte dalla viabilità pertinente al sito ed il contesto territoriale in cui si colloca la viabilità, tale aspetto può essere considerato nel presente studio come trascurabile, raccomandando comunque la buona manutenzione della pavimentazione stradale ed evidenziando di seguito alcune raccomandazioni in fase di esercizio.

Allo scopo di ottimizzare il rapporto dell'opera nella fase di esercizio con l'ambiente circostante, si indicano delle possibili opere di mitigazioni, le quali potrebbero eventualmente essere messe in atto.

Per la riduzione delle vibrazioni associato alla fase di esercizio è necessario premettere che uno dei sistemi di mitigazione più efficienti è la manutenzione del manto stradale; la predisposizione di adeguati piani di manutenzione programmata del manto stradale nel corso della vita del sito, ne assicura la conservazione delle caratteristiche di continuità, evitando pertanto la formazione di discontinuità, ammaloramenti, ormaie o quant'altro possa determinare la generazione di azioni dinamiche in grado di sollecitare il corpo stradale ed il terreno sottostante, con conseguente propagazione laterale delle vibrazioni. È infatti evidente il ruolo svolto dalla rugosità del fondo stradale, e pertanto dalle sue condizioni di manutenzione, nella riduzione dell'entità delle vibrazioni trasmesse nel terreno circostante; tale evidenza fisica è rappresentata nella figura seguente, da cui si ricava che, a parità di altre condizioni, la cattiva manutenzione del fondo stradale può comportare un incremento, anche di un ordine di grandezza, dell'ampiezza delle vibrazioni trasmesse ad un edificio.

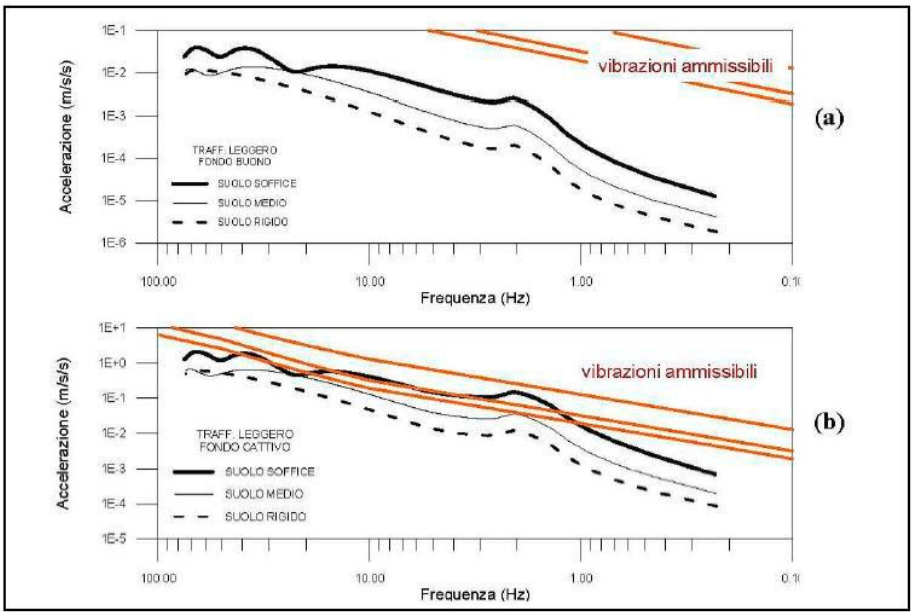


Figura 7-10 - Influenza della rugosità del fondo stradale - (a) fondo buono - (b) fondo scadente

Gli interventi di mitigazione delle vibrazioni eventuali possono essere suddivisi in due tipologie:

- Interventi di tipo passivo;
- Interventi di tipo attivo.

Gli interventi di tipo passivo consistono nella riduzione della propagazione delle vibrazioni introducendo degli ostacoli nel mezzo di propagazione delle stesse nel percorso tra la sorgente ed il ricettore. Interventi di tipo passivo possono essere trincee profonde o diaframmi realizzati nel terreno parallelamente alla strada, i quali interrompono la propagazione delle onde. I diaframmi possono essere realizzati verticalmente con spostamento del suolo (p.es. infissione setto prefabbricato), con mescolamento di suolo in situ (p.es. jet-grouting) o con asportazione del terreno (p.es. trincee profonde).

Gli interventi di tipo attivo hanno lo scopo di ridurre l'emissione della vibrazione sulla sorgente e possono prevedere interventi sulla piattaforma stradale. Gli interventi di tipo attivo possono essere relativi a platee di tipo flottante, con materassino elastomerico, oppure utilizzando manufatti flottanti in calcestruzzo armato, con sospensioni in gomma come piastre elastomeriche.

In generale, la soluzione prevede quindi che sia individuato il tipo di materassino antivibrante che si intende impiegare nell'opera e la sua integrazione nel pacchetto stradale. Da letteratura i materassini (elastomerici) hanno una densità da 100 a 600 kg/m^3, spessori da 20 a 50 mm e prestazioni di riduzione delle vibrazioni di almeno 10 dB. In applicazione in tratti allo scoperto la scelta dovrà prevedere materiali adatti per applicazione all'esterno.

8 CONCLUSIONI

Il presente studio ha riguardato la Valutazione Previsionale di Impatto Vibrazionale relativa alla realizzazione ed esercizio del Data Center "*LIN 10*" nel Comune di Treviglio, in base alla norma UNI 9614:2017 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo".

Lo scopo del presente studio è la verifica dei livelli all'interno dei ricettori potenzialmente influenzati dalle emissioni di vibrazioni dell'impianto in esame, con riferimento alla UNI 9614:2017, nonché delle eventuali misure di mitigazione realizzabili.

L'indagine dello stato attuale individua un'area in cui le emissioni delle vibrazioni attuali rispettano i limiti previsti dalla UNI 9614:2017. Ai fini della verifica dell'impatto delle vibrazioni in fase di progetto è stato sviluppato un modello previsionale per valutare i livelli di vibrazione generati dal Data Center in progetto, nell'ambito del suo funzionamento a regime, che comprende anche le operazioni di test di manutenzione dei generatori di emergenza.

Per quanto riguarda i chiller, si può ritenere che, qualora siano posizionati su sistemi antivibranti appropriati e collegati alle reti impiantistiche tramite giunti flessibili, essi non costituiscano sorgenti significative di vibrazione, né generino livelli vibrazionali tali da risultare percepibili o da propagarsi nel terreno circostante.

Per quanto riguarda le accensioni dei generatori in condizioni di emergenza, tali eventi non sono stati considerati nella presente valutazione vibrazionale. Coerentemente con quanto previsto per la componente rumore, le emissioni associate alle condizioni di emergenza non rientrano infatti tra gli scenari oggetto di valutazione, in quanto non soggette ai limiti normativi applicabili alle ordinarie condizioni di esercizio, come richiamato dalle Linee Guida MASE (D.D. VA n. 257 del 02/08/2024) con riferimento alla componente acustica. Pertanto, anche la corrispondente componente vibrazionale associata alle accensioni in emergenza non è stata oggetto della presente analisi.

Il test di verifica sarà effettuato attivando un solo generatore per volta e mai uno o più generatori contemporaneamente. L'analisi mostra che i limiti saranno comunque rispettati durante il regolare funzionamento del Data Center, inclusi i test di verifica dei generatori di emergenza.

Al fine di valutare le emissioni di vibrazione in fase di esercizio, la funzione di trasferimento è stata definita assumendo che lo spettro di emissione vibrazionale di un generatore elettrico diesel installato in box insonorizzato sia assimilabile a quello di un autocarro.

Sono stati pertanto analizzati i livelli vibrazionali ottenuti mediante la valutazione delle mappe di isolivello e delle relative interferenze con i ricettori considerati. Sulla base dei risultati ottenuti, si conclude che il contributo delle vibrazioni generate dal Data Center nella fase di esercizio risulta conforme ai limiti di riferimento previsti dalla UNI 9614:2017 presso tutti i ricettori considerati, sia nel periodo diurno sia nel periodo notturno.

Per la fase di cantiere, la valutazione è stata condotta considerando un unico scenario operativo, corrispondente alle attività di demolizione previste per le porzioni del fabbricato esistente, individuate quale configurazione potenzialmente più impattante ai fini della valutazione vibrazionale. Lo scenario considerato è pertanto il seguente:

- Scenario 01: Fase di demolizione

Come già precedentemente indicato, per la valutazione delle lavorazioni di cantiere è stata applicata la metodologia del "*Worst Case Scenario*". Questo permette di valutare le condizioni di esposizione alle vibrazioni indotte dalle attività di cantiere e di verificare il rispetto dei limiti della norma UNI 9614:2017 nelle condizioni operative più gravose sul territorio, che, nel caso positivo, permettono di accertare una condizione di rispetto anche nelle situazioni meno critiche.

Lo scenario analizzato, relativo alle attività di demolizione sul fabbricato esistente, risulta conforme ai limiti di riferimento previsti dalla UNI 9614:2017 per tutti i ricettori considerati, sia a destinazione residenziale sia a destinazione produttiva-commerciale. Non si prevedono, pertanto, superamenti dei limiti normativi presso alcun ricettore, anche nelle condizioni operative più gravose considerate nell'ambito della valutazione.

Si evidenzia, inoltre, che le ipotesi assunte per il modello vibrazionale sono fortemente cautelative, in quanto tutte le sorgenti emissive presenti all'interno dei cantieri fissi sono state modellate come sorgenti puntuali, ipotizzate contemporaneamente attive e localizzate in corrispondenza del perimetro dell'area di cantiere.

In termini di disturbo alle persone, va evidenziato come, in generale, tutte le lavorazioni che danno origine a vibrazioni e che potrebbero arrecare disturbo ai residenti prossimi alle aree di lavoro si svolgano in orario diurno. In termini di severità, l'impatto atteso si estenderà alla sola limitata durata dei lavori e sarà, quindi, limitato nel tempo, senza determinare il superamento dei limiti di riferimento presso i ricettori considerati.

Pur non rendendosi necessarie specifiche misure di mitigazione, in considerazione del rispetto dei limiti di riferimento, si ritiene opportuno adottare alcune buone pratiche operative finalizzate a minimizzare ulteriormente gli effetti vibrazionali, quali la conduzione dei mezzi in cantiere con diligenza, in modo da evitare la generazione di vibrazioni non utili al ciclo di lavoro, oltre al coordinamento delle lavorazioni in funzione della fruizione dei ricettori.

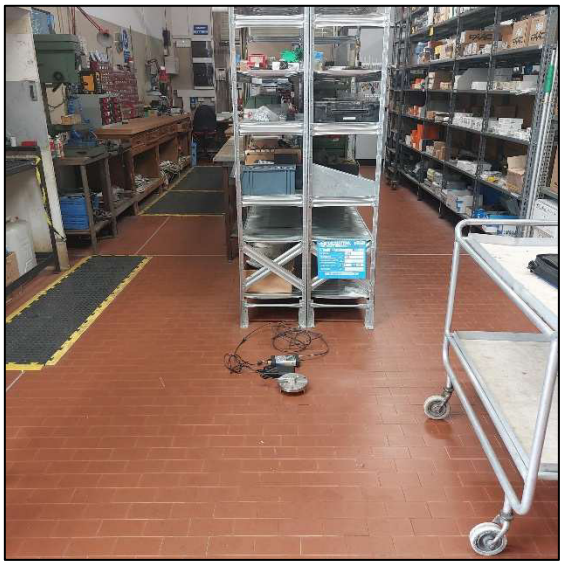
Alla luce degli esiti della presente valutazione, non si rende necessaria la predisposizione di uno specifico Piano di Gestione dell'Impatto Vibrazionale di Cantiere ai fini del rispetto dei limiti previsti dalla UNI 9614:2017. Resta comunque facoltà dell'Appaltatore adottare, nell'ambito della gestione del cantiere, ulteriori misure organizzative e gestionali volte a minimizzare gli effetti vibrazionali durante le lavorazioni.

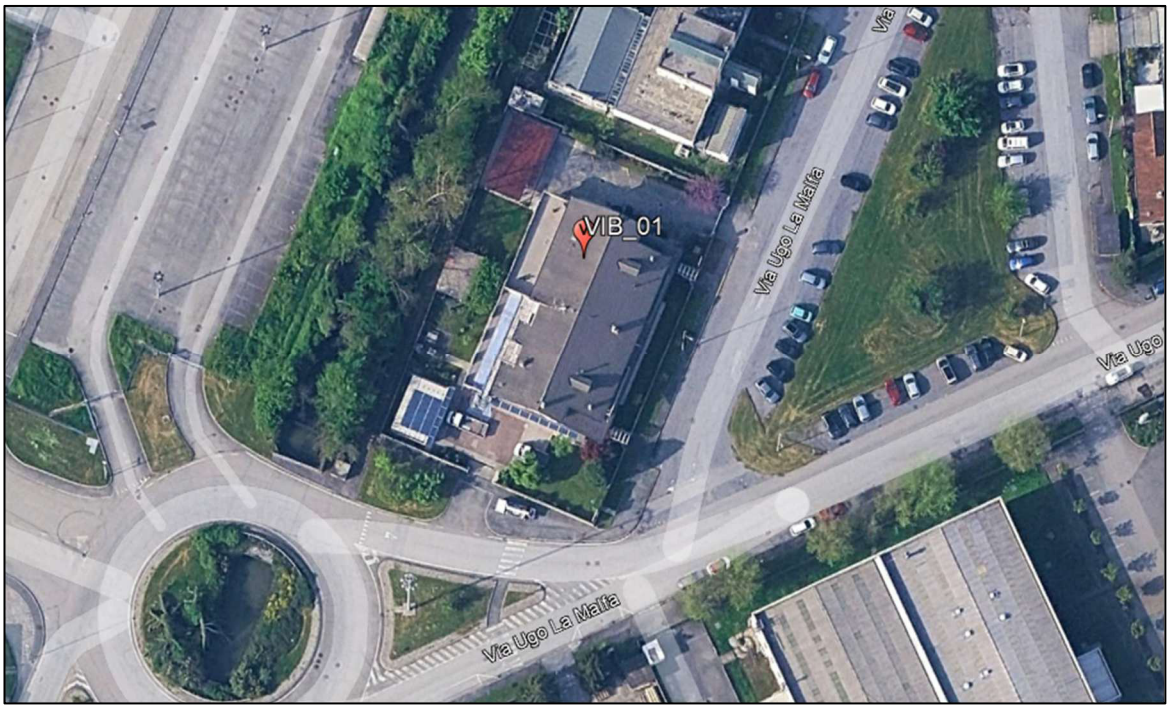
Allegato 1 – Certificati misure vibrometriche

MISURA DI VIBRAZIONI - UNI 9614:2017

Postazione:	**VIB01**
Indirizzo:	**Via Ugo la Malfa (45°30'36.94"N; 9°34'8.01"E)**
Data e ora inizio rilevazione:	**dal 26.08.26 ore 10:00 al 27.08.26 ore 10:00**
Strumentazione impiegata:	**SVAN 958A matricola 59197**
Tecnico	**Alessandro Boni**

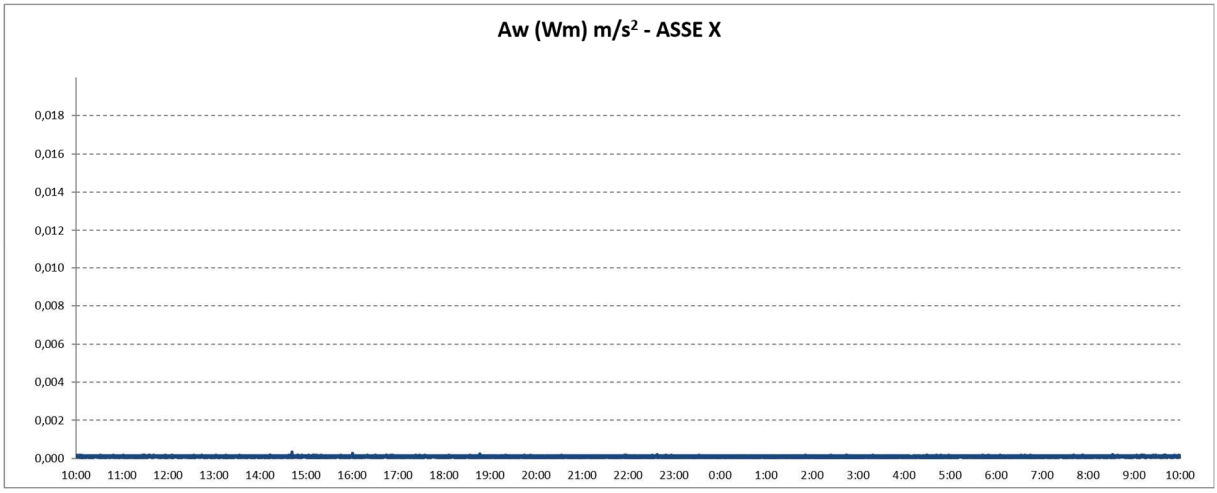
DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA E LOCALIZZAZIONE SITO DI INDAGINE

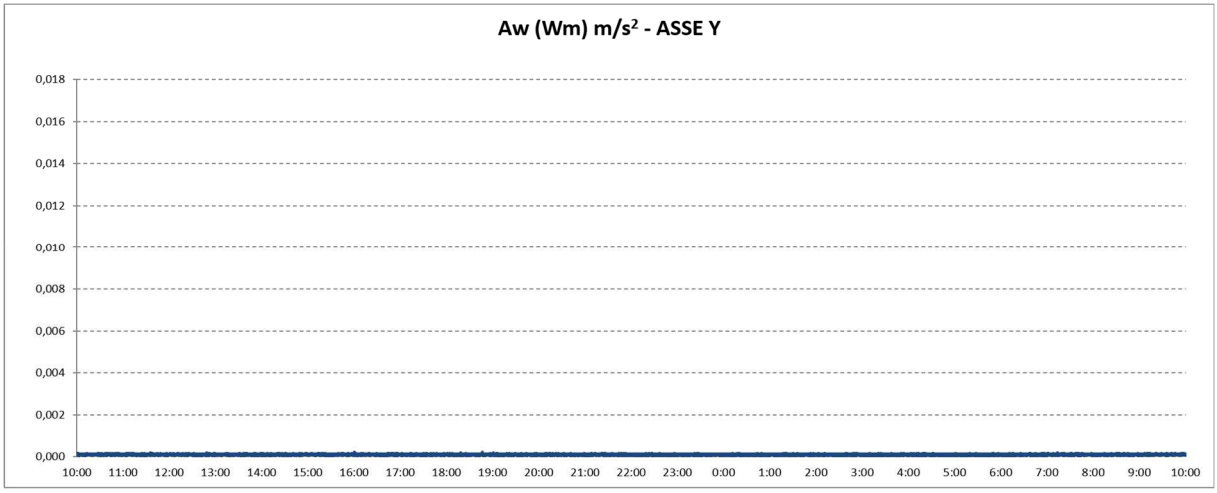


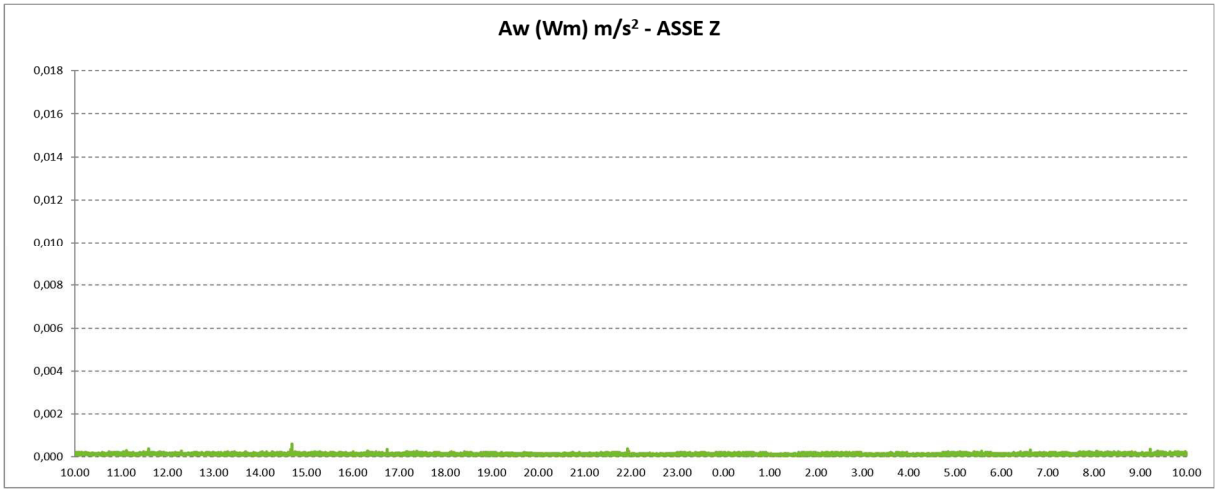


TIME HISTORY – ASSE X, ASSE Y e ASSE Z

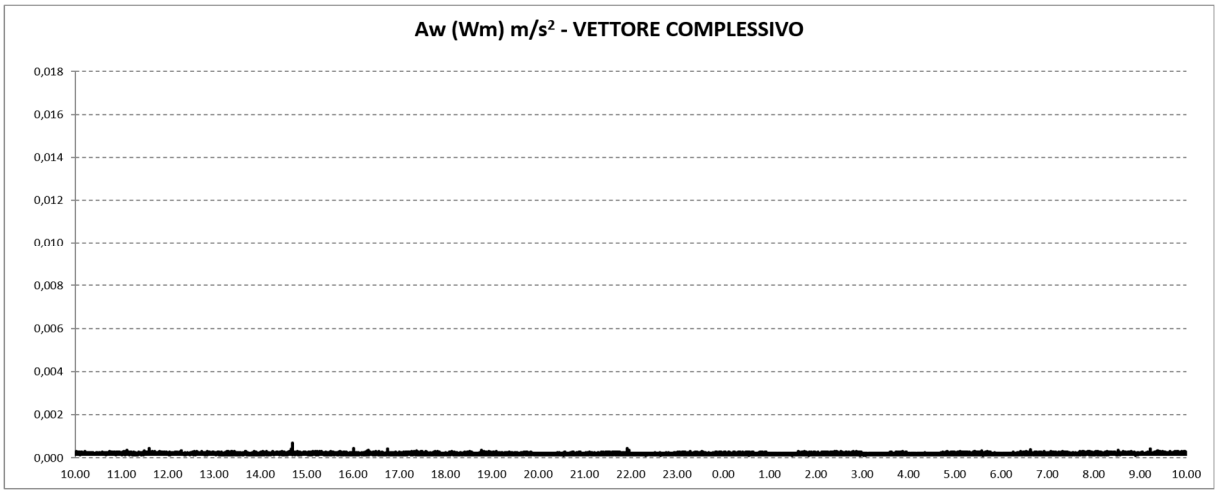
Impostazione acquisizione: campionamento al secondo (1s) contemporaneamente sui tre assi ortogonali con terna accelerometrica, filtro di ponderazione Wm.







TIME HISTORY – VETTORE COMPLESSIVO



VETTORE IMMISSIONE (Vimm) - PERIODO DIURNO

Valore di Immissione - Valutazione eventi periodo diurno (Massimo valore di accelerazione caratterizzante il periodo)			
Eventi di riferimento	**Media aw Max** (m/s^2)	**SIGMA scarto aw** (m/s^2)	**Vimm DIU aw 95** (m/s^2)
Identificati 500 eventi nel periodo di riferimento	0,0003	0,0000	0,0003

VETTORE IMMISSIONE (Vimm) - PERIODO NOTTURNO

Valore di Immissione - Valutazione eventi periodo notturno (Massimo valore di accelerazione caratterizzante il periodo)			
Eventi di riferimento	**Media aw Max** (m/s^2)	**SIGMA scarto aw** (m/s^2)	**Vimm NOT aw 95** (m/s^2)
Identificati 250 eventi nel periodo di riferimento	0,0003	0,0000	0,0003

VETTORE RESIDUO (Vres)

Valore di Residuo - Valutazione eventi (Massimo valore di residuo)			
Eventi di riferimento (determinato con eventi in assenza di traffico veicolare e/o altri sorgenti)	**Media aw Max** (m/s^2)	**SIGMA scarto aw** (m/s^2)	**Vres aw 95** (m/s^2)
Periodo diurno: identificati 500 eventi assimilati a vibrazioni residue	0,0001	0,0000	0,0001
Periodo notturno: identificati 250 eventi assimilati a vibrazioni residue	0,0001	0,0000	0,0001

VETTORE SORGENTE (Vsorg)

Valore di riferimento proposto: UNI 9614:2017 “Misure delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo” per abitazioni (diurno: 6:00 - 22:00) confronto parametro descrittore della sorgente Vsorg con i limiti di riferimento (periodo diurno: 7,2 mm/s^2), per abitazioni (notte: 22:00 - 6:00) confronto parametro descrittore della sorgente Vsorg con i limiti di riferimento (periodo notturno: 3,6 mm/s^2), per luoghi di lavoro confronto parametro descrittore della sorgente Vsorg con i limiti di riferimento: 14 mm/s^2; ospedali, case di cura ed affini: 2 mm/s^2; asili e case di riposo: 3,6 mm/s^2; scuole e università: 5,4 mm/s^2.

Valutazione del disturbo secondo la normativa UNI 9614:2017			
Periodo di riferimento	**Vsorg**		**Valutazione**
	m/s^2	mm/s^2	
Diurno	0,0003	0,3	Valore misurato inferiore al limite interno per luoghi di lavoro pari a 14 mm/s^2
Notturno	0,0003	0,3	Valore misurato inferiore al limite interno per luoghi di lavoro pari a 14 mm/s^2

Allegato 2 – Certificati strumentazione

Sky-lab S.r.l.
Area Laboratori
Via Belvedere, 42 Arcore (MB)
Tel. 039 5783463
skylab.tarature@outlook.it

Centro di Taratura LAT N° 163
Calibration Centre
Laboratorio Accreditato di Taratura
Accredited Calibration Laboratory

LAT N° 163

CERTIFICATO DI TARATURA LAT 163 35443-V
Certificate of Calibration LAT 163 35443-V

- data di emissione *date of issue*	2025-05-05
- cliente *customer*	AMBIENTE S.P.A. 54033 - CARRARA (MS)
- destinatario *receiver*	AMBIENTE S.P.A. 54033 - CARRARA (MS)

Si riferisce a
Referring to

- oggetto *item*	Misuratore + Accelerometro
- costruttore *manufacturer*	Svantek + Svantek
- modello *model*	958 + SV84
- matricola *serial number*	59197 Ch 1-2-3 + N1471
- data di ricevimento oggetto *date of receipt of item*	2025-04-28
- data delle misure *date of measurements*	2025-05-05
- registro di laboratorio *laboratory reference*	Reg. 03

Il presente certificato di taratura è emesso in base all'accreditamento LAT N° 163 rilasciato in accordo ai decreti attuativi della legge n. 273/1991 che ha istituito il Sistema Nazionale di Taratura (SNT). ACCREDIA attesta le capacità di misura e di taratura, le competenze metrologiche del Centro e la riferibilità delle tarature eseguite ai campioni nazionali e internazionali delle unità di misura del Sistema Internazionale delle Unità (SI).
Questo certificato non può essere riprodotto in modo parziale, salvo espressa autorizzazione scritta da parte del Centro.

This certificate of calibration is issued in compliance with the accreditation LAT N° 163 granted according to decrees connected with Italian law No. 273/1991 which has established the National Calibration System. ACCREDIA attests the calibration and measurement capability, the metrological competence of the Centre and the traceability of calibration results to the national and international standards of the International System of Units (SI).
This certificate may not be partially reproduced, except with the prior written permission of the issuing Centre.

I risultati di misura riportati nel presente Certificato sono stati ottenuti applicando le procedure di taratura citate alla pagina seguente, dove sono specificati anche i campioni o gli strumenti che garantiscono la catena di riferibilità del Centro e i rispettivi certificati di taratura in corso di validità. Essi si riferiscono esclusivamente all'oggetto in taratura e sono validi nel momento e nelle condizioni di taratura, salvo diversamente specificato.
The measurement results reported in this Certificate were obtained following the calibration procedures given in the following page, where the reference standards or instruments are indicated which guarantee the traceability chain of the laboratory, and the related calibration certificates in the course of validity are indicated as well. They relate only to the calibrated item and they are valid for the time and conditions of calibration, unless otherwise specified.

Le incertezze di misura dichiarate in questo documento sono state determinate conformemente alla Guida ISO/IEC 98 e al documento EA-4/02. Solitamente sono espresse come incertezza estesa ottenuta moltiplicando l'incertezza tipo per il fattore di copertura k corrispondente ad un livello di fiducia di circa il 95 %. Normalmente tale fattore k vale 2.
The measurement uncertainties stated in this document have been determined according to the ISO/IEC Guide 98 and to EA-4/02. Usually, they have been estimated as expanded uncertainty obtained multiplying the standard uncertainty by the coverage factor k corresponding to a confidence level of about 95%. Normally, this factor k is 2.

Direzione Tecnica
(Approving Officer)

Firmato digitalmente da:
EMILIO GIOVANNI CAGLIO
Data: 05/05/2025 12:31:50

Sky-lab S.r.l.
Area Laboratori
Via Belvedere, 42 Arcore (MB)
Tel. 039 5783463
skylab.tarature@outlook.it

Centro di Taratura LAT N° 163
Calibration Centre
Laboratorio Accreditato di Taratura
Accredited Calibration Laboratory

LAT N° 163

CERTIFICATO DI TARATURA LAT 163 35443-V
Certificate of Calibration LAT 163 35443-V

Di seguito vengono riportate le seguenti informazioni:
- la descrizione dell'oggetto in taratura (se necessaria);
- l'identificazione delle procedure in base alle quali sono state eseguite le tarature;
- gli strumenti/campioni che garantiscono la riferibilità del Centro;
- gli estremi dei certificati di taratura di tali campioni e l'Ente che li ha emessi;
- il luogo di taratura (se effettuata fuori dal Laboratorio);
- le condizioni ambientali e di taratura;
- i risultati delle tarature e la loro incertezza estesa.

In the following, information is reported about:
- description of the item to be calibrated (if necessary);
- technical procedures used for calibration performed;
- instruments or measurement standards which guarantee the traceability chain of the Centre;
- relevant calibration certificates of those standards with the issuing Body;
- site of calibration (if different from Laboratory);
- calibration and enviromental conditions;
- calibration results and their expanded uncertainty.

Strumenti sottoposti a verifica
Instrumentation under test

Strumento	Costruttore	Modello	Matricola
Misuratore	Svantek	958	59197 Ch 1-2-3
Accelerometro	Svantek	SV84	N1471

Procedure tecniche, norme e campioni di riferimento
Technical procedures, Standards and Traceability

I risultati di misura riportati nel presente Certificato sono stati ottenuti applicando la procedura di taratura N. PR 25 Rev.3.
Le verifiche effettuate sull'oggetto della taratura sono in accordo con quanto previsto dalla norma ISO 8041:2017 paragrafo 14.
Le tolleranze riportate sono relative alla classe di appartenenza dello strumento come definito nella norma ISO 8041:2017.
Nella tabella sottostante vengono riportati gli estremi dei campioni di riferimento dai quali ha inizio la catena della riferibilità del Centro.

Strumento	Matricola	Certificato	Data taratura	Data scadenza
Barometro Druck RPT410V	1614002	LAT 128 128P-836/24	2024-10-09	2025-10-09
Scheda acquisizione National Instruments NI USB-4431	150059D	LAT 019 75930	2024-09-20	2026-09-20
Scheda acquisizione National Instruments NI USB-4431	150059D	INRIM 24-0658-08	2024-10-09	2026-10-09
Accelerometro PCB Piezotronics 301A10	3272	INRIM 23-0489-01	2023-06-06	2025-06-06
Amplificatore di tensione PCB Piezotronics 482A21	2836	INRIM 23-0489-01	2023-06-05	2025-06-05
Termoigrometro LogTag UHADO-16	A0C1012974L5	128U-538/23	2023-05-23	2025-05-23
Accelerometro PCB Piezotronics 3711F112G	14788	INRIM 24-0658-05	2024-10-09	2026-10-09

Condizioni ambientali durante le misure
Enviromental parameters during measurements

Parametro	Di riferimento	Intervallo di validità	All'inizio delle misure	Alla fine delle misure
Temperatura / °C	23	da 18 a 28	25	25
Umidità / %	50	da 0 a 75	47	47
Pressione / hPa	1013	da 800 a 1050	998	998

Nella determinazione dell'incertezza non è stata presa in considerazione la stabilità nel tempo dell'oggetto in taratura.

Sky-lab S.r.l.
Area Laboratori
Via Belvedere, 42 Arcore (MB)
Tel. 039 5783463
skylab.tarature@outlook.it

CERTIFICATO DI TARATURA LAT 163 35443-V
Certificate of Calibration LAT 163 35443-V

1. Ispezione preliminare

Durante questa fase vengono eseguiti i controlli preliminari sulla strumentazione in taratura. I risultati di tali controlli sono riportati nella tabella sottostante.

Controllo	Esito
Ispezione visiva iniziale	OK
Integrità meccanica	OK
Integrità funzionale	OK
Equilibrio termico	OK
Alimentazione	OK
Luogo di taratura	SEDE

2. Misurando, modalità e condizioni di misura

Il misurando è l'accelerazione letta sullo strumento in taratura. La taratura è stata eseguita applicando il metodo di confronto con la catena di riferimento.

Impostazioni			
	Asse X	Asse Y	Asse Z
Metodo di fissaggio	colla cianoacrilica	colla cianoacrilica	colla cianoacrilica
Coppia di serraggio	non applicabile	non applicabile	non applicabile
Materiale supporto	acciaio inox	acciaio inox	acciaio inox
Orientamento trasduttore	orizzontale	orizzontale	orizzontale
Temperatura stimata trasduttore	24,8 °C	24,8 °C	24,8 °C
Range	High n,a,	High n,a,	High n,a,
Pesatura in frequenza	Wm	Wm	Wm

3. Sensibilità dell'intera catena

Nella tabella sottostante viene riportato il valore di sensibilità dell'intera catena alla frequenza specificata. Viene specificata sia la sensibilità letta prima della messa in punto sia dopo la messa in punto.
L'incertezza riportata in tabella è uguale a 2,5 % + r % eccedente a 0.5, dove r è il contributo della risoluzione dello strumento in taratura.

Asse	Frequenza / Hz	Sensibilità iniziale / mV/(m/s²)	Sensibilità finale / mV/(m/s²)	Ritarato	Incertezza / %
Asse X	16	106	106	no	2,5
Asse Y	16	108	108	no	2,5
Asse Z	16	105	105	no	2,5

Sky-lab S.r.l.
Area Laboratori
Via Belvedere, 42 Arcore (MB)
Tel. 039 5783463
skylab.tarature@outlook.it

CERTIFICATO DI TARATURA LAT 163 35443-V
Certificate of Calibration LAT 163 35443-V

4. Risposta dell'intera catena

Le tolleranze riportate sono quelle della norma ISO 8041:2017.

L'incertezza riportata in tabella è uguale a 2,5 % + r % eccedente a 0.5, dove r è il contributo della risoluzione dello strumento in taratura.

Asse X

Frequenza / Hz	Accelerazione impostata / m/s²	Accelerazione di riferimento pesata / m/s²	Lettura strumento / m/s²	Differenza / %	Incertezza / %	Tolleranza norma / %
2	1,0	0,929	0,922	-0,7	2,5	+12/-11
8	1,0	0,606	0,617	1,8	2,5	+12/-11
16	0,1	0,034	0,0343	0,3	2,5	+6/-6
16	1,0	0,336	0,338	0,7	2,5	+6/-6
16	10,0	3,366	3,39	0,7	2,5	+6/-6
63	1,0	0,083	0,0836	0,2	2,5	+12/-11

Asse Y

Frequenza / Hz	Accelerazione impostata / m/s²	Accelerazione di riferimento pesata / m/s²	Lettura strumento / m/s²	Differenza / %	Incertezza / %	Tolleranza norma / %
2	1,0	0,930	0,915	-1,6	2,5	+12/-11
8	1,0	0,609	0,614	0,8	2,5	+12/-11
16	0,1	0,034	0,0340	-0,3	2,5	+6/-6
16	1,0	0,334	0,334	0,0	2,5	+6/-6
16	10,0	3,361	3,35	-0,3	2,5	+6/-6
63	1,0	0,083	0,0830	-0,5	2,5	+12/-11

Asse Z

Frequenza / Hz	Accelerazione impostata / m/s²	Accelerazione di riferimento pesata / m/s²	Lettura strumento / m/s²	Differenza / %	Incertezza / %	Tolleranza norma / %
2	1,0	0,930	0,925	-0,6	2,5	+12/-11
8	1,0	0,610	0,622	2,0	2,5	+12/-11
16	0,1	0,034	0,0343	0,3	2,5	+6/-6
16	1,0	0,336	0,339	1,0	2,5	+6/-6
16	10,0	3,363	3,38	0,5	2,5	+6/-6
63	1,0	0,083	0,0802	-3,8	2,5	+12/-11

Sky-lab S.r.l.
Area Laboratori
Via Belvedere, 42 Arcore (MB)
Tel. 039 5783463
skylab.tarature@outlook.it

Centro di Taratura
Calibration Centre

Laboratorio di Taratura
Calibration Laboratory

00268

Certificato di Taratura
Certificate of Calibration

00268LAT 36168-V

- data di emissione *date of issue*	2025-07-25
- cliente *customer*	AMBIENTE S.R.L. 54033 - CARRARA (MS)
- destinatario *receiver*	AMBIENTE S.R.L. 54033 - CARRARA (MS)

Si riferisce a
Referring to

- oggetto *item*	Calibratore Accelerometrico
- costruttore *manufacturer*	Tenlee
- modello *model*	VC-01
- matricola *serial number*	901009
- data di ricevimento oggetto *date of receipt of item*	2025-07-25
- data delle misure *date of measurements*	2025-07-25
- registro di laboratorio *laboratory reference*	Reg. 03

Il presente certificato di taratura è emesso in base all'accreditamento n. 00268 Calibration che attesta le capacità di misura e di taratura, le competenze metrologiche del Centro e la riferibilità delle tarature eseguite ai campioni nazionali e internazionali delle unità di misura del Sistema Internazionale delle Unità (SI) in conformità ai requisiti della norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025. L'accreditamento è rilasciato in accordo ai decreti attuativi della legge n. 273/1991 che ha istituito il Sistema Nazionale di Taratura (SNT).

This certificate of calibration is issued in compliance with the accreditation n 00268 Calibration attesting the calibration and measurement capability, the metrological competence of the Centre and the traceability of calibration results to the national and international standards of the International System of Units (SI) in compliance with requirements of ISO/IEC 17025. The accreditation is granted according to decrees connected with Italian law No. 273/1991 which has established the National Calibration System.

I risultati di misura riportati nel presente Certificato sono stati ottenuti applicando le procedure di taratura citate alla pagina seguente, dove sono specificati anche i campioni o gli strumenti che garantiscono la catena di riferibilità del Centro e i rispettivi certificati di taratura in corso di validità. Essi si riferiscono esclusivamente all'oggetto in taratura e sono validi nel momento e nelle condizioni di taratura, salvo diversamente specificato.
The measurement results reported in this Certificate were obtained following the calibration procedures given in the following page, where the reference standards or instruments are indicated which guarantee the traceability chain of the laboratory, and the related calibration certificates in the course of validity are indicated as well. They relate only to the calibrated item and they are valid for the time and conditions of calibration, unless otherwise specified.

Le incertezze di misura dichiarate in questo documento sono state determinate conformemente alla ISO/IEC Guide 98-3 e al documento EA-4/02. Solitamente sono espresse come incertezza estesa ottenuta moltiplicando l'incertezza tipo per il fattore di copertura k corrispondente ad un livello di fiducia di circa il 95 %. Normalmente tale fattore k vale 2.
The measurement uncertainties stated in this document have been determined according to the ISO/IEC Guide 98-3 and to EA-4/02. Usually, they have been estimated as expanded uncertainty obtained multiplying the standard uncertainty by the coverage factor k corresponding to a confidence level of about 95%. Normally, this factor k is 2.

Direzione Tecnica
(Approving Officer)

.....

Firmato digitalmente da:
EMILIO GIOVANNI CAGLIO
Data: 30/07/2025 10:31:12

Sky-lab S.r.l.
Area Laboratori
Via Belvedere, 42 Arcore (MB)
Tel. 039 5783463
skylab.tarature@outlook.it

Centro di Taratura
Calibration Centre

Laboratorio di Taratura
Calibration Laboratory

00268

Certificato di Taratura
Certificate of Calibration

00268LAT 36168-V

Di seguito vengono riportate le seguenti informazioni:
- la descrizione dell'oggetto in taratura (se necessaria);
- l'identificazione delle procedure in base alle quali sono state eseguite le tarature;
- una dichiarazione che identifichi in quale modo le misure sono metrologicamente riferibili;
- il luogo di taratura (se effettuata fuori dal Laboratorio);
- le condizioni ambientali e di taratura;
- i risultati delle tarature e la loro incertezza estesa.

In the following, information is reported about:
- description of the item to be calibrated (if necessary);
- technical procedures used for calibration performed;
- a statement identifying how the measurements are metrologically traceable;
- site of calibration (if different from Laboratory);
- calibration and enviromental conditions;
- calibration results and their expanded uncertainty.

Il presente Certificato di Taratura viene rilasciato in conformità alle prescrizioni dell'accreditamento concesso da ACCREDIA che ha valutato le capacità di taratura e misura del Laboratorio LAT n. 00268 e la sua riferibilità delle misure al sistema di unità SI o, nel caso questo non sia tecnicamente possibile, ad altri riferimenti accettati a livello internazionale.

Strumenti sottoposti a verifica
Instrumentation under test

Strumento	Costruttore	Modello	Matricola
Calibratore Accelerometrico	Tenlee	VC-01	901009

Procedure tecniche e norme
Technical procedures and standards

I risultati di misura riportati nel presente Certificato sono stati ottenuti applicando la procedura di taratura N. PR 22 Rev. 5.
Le verifiche effettuate sull'oggetto della taratura sono in accordo con il metodo interno di taratura per confronto con accelerometro tarato secondo la ISO 16063-21:2003.

Condizioni ambientali durante le misure
Enviromental parameters during measurements

Parametro	Di riferimento	Intervallo di validità	All'inizio delle misure	Alla fine delle misure
Temperatura / °C	23	da 18 a 28	25	25
Umidità / %	50	da 0 a 75	53	53
Pressione / hPa	1013	da 800 a 1050	992	992

Nella determinazione dell'incertezza non è stata presa in considerazione la stabilità nel tempo dell'oggetto in taratura.

Sky-lab S.r.l.
Area Laboratori
Via Belvedere, 42 Arcore (MB)
Tel. 039 5783463
skylab.tarature@outlook.it

Centro di Taratura
Calibration Centre

Laboratorio di Taratura
Calibration Laboratory

00268

Certificato di Taratura
Certificate of Calibration

00268LAT 36168-V

1. Ispezione preliminare

Durante questa fase vengono eseguiti i controlli preliminari sulla strumentazione in taratura. I risultati di tali controlli sono riportati nella tabella sottostante.

Controllo	Esito
Ispezione visiva iniziale	OK
Integrità meccanica	OK
Integrità funzionale	OK
Equilibrio termico	OK
Alimentazione	OK
Luogo di taratura	SEDE

2. Misurando, modalità e condizioni di misura

Il misurando è il livello di accelerazione RMS generato, la sua stabilità, frequenza e relativa stabilità e distorsione totale. Il livello di accelerazione generato è calcolato come il rapporto tra la tensione in uscita dalla catena di riferimento e la sensibilità della catena di riferimento stessa. La taratura per la determinazione dell'ampiezza dell'accelerazione, è stata eseguita tramite il metodo del confronto con la catena di riferimento.

3. Livello di accelerazione generato

In questa prova viene verificato il livello di accelerazione generato e la sua stabilità in ampiezza.

Livello nominale m/s²	Livello generato m/s²	Errore %	Massa applicata g	Stabilità livello %	Incertezza %
9,80	9,79	-0,08	10,8	0,40	0,80
9,80	9,86	0,65	64,5	0,12	0,80

4. Frequenza del livello generato

In questa prova viene verificata la frequenza del segnale generato e la relativa stabilità.

Frequenza nominale Hz	Frequenza generata Hz	Errore %	Massa applicata g	Stabilità frequenza %	Incertezza Hz
159,16	159,20	0,03	10,8	0,00	0,04
159,16	159,20	0,03	64,5	0,00	0,04

5. Distorsione del livello generato

In questa prova viene misurata la distorsione totale del segnale generato dal calibratore.

Livello nominale m/s²	Livello generato m/s²	Distorsione %	Massa applicata g	Incertezza %
9,80	9,79	2,90	10,8	0,12
9,80	9,86	0,54	64,5	0,12

Fine del certificato
End of certificate